

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR MARCELO BUCHLI
..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 30/07/2010

.....
Prof. Jelson de Oliveira Gomes
Coord. Graduação de IEM

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Marcelo Buchli

**Análise de manufatura e de produto para a
utilização do ferro fundido austemperado ADI
Grau 3 em eixo comando de válvulas de
motores Diesel**

Campinas, 2010.

Marcelo Buchli

Análise de manufatura e de produto para a utilização do ferro fundido austemperado ADI Grau 3 em eixo comando de válvulas de motores Diesel

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado da Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Estadual de
Campinas, como requisito para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais

Orientador: Prof. Dr. Eng. Jefferson de Oliveira Gomes

Campinas

2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B853a Buchli, Marcelo
 Análise de manufatura e de produto para a utilização do
ferro fundido austemperado ADI grau 3 em eixo comando
de válvulas de motores Diesel / Marcelo Buchli. --
Campinas, SP: [s.n.], 2010.

 Orientador: Jefferson de Oliveira Gomes.
 Dissertação de Mestrado (Profissional) - Universidade
Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia
Mecânica.

 1. Ferro fundido. 2. Válvulas. I. Gomes, Jefferson de
Oliveira. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Product and manufacturing analysis of austempered ductile
iron ADI grade 3 using for Diesel engine camshaft

Palavras-chave em Inglês: Cast iron, Valves

Área de concentração: Materiais

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Anderson Vicente Borille, Jorge Otubo

Data da defesa: 30/07/2010

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

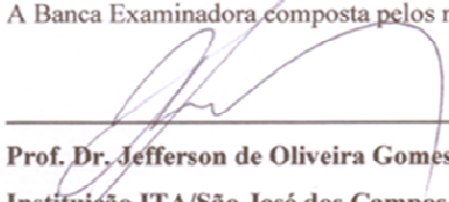
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

Análise de manufatura e de produto para a utilização do ferro fundido austemperado ADI Grau 3 em eixo comando de válvulas de motores Diesel

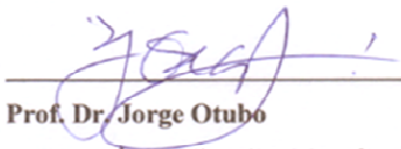
Autor: **Marcelo Buchli**

Orientador: Prof. Dr. Eng. Jefferson de Oliveira Gomes

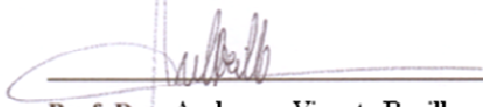
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Jefferson de Oliveira Gomes
Instituição ITA/São José dos Campos



Prof. Dr. Jorge Otubo
Instituição ITA/São José dos Campos



Prof. Dr. Anderson Vicente Borille

Instituição ITA/São José dos Campos

São José dos Campos, 30 de julho de 2010.

Dedico este trabalho à minha querida esposa e filhos que me suportaram durante os meus estudos.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas e instituições às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas do CCM do ITA, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A MWM-International que promoveu este mestrado e os colegas do laboratório de análises de materiais.

A indústria Mecânica Uel e a fundição Tupy.

Em especial aos Srs. Marcelo Vasconcelos Carvalho, Davi Melo Montenegro, Daniel Rossi Korol e Adilson Souza Teixeira que acompanharam de perto o desenvolvimento deste trabalho.

Quem tem amigos não precisa de dinheiro.

Resumo

Neste trabalho foi estudado o ferro fundido austemperado (ADI) grau 3 para substituir o aço forjado SAE 1045 temperado e revenido na aplicação do eixo comando de válvulas para motores Diesel. Na comparação dos materiais foram verificadas as propriedades mecânicas através de ensaios de laboratório e na literatura. A resistência ao desgaste foi a principal propriedade mecânica avaliada. Com o objetivo de se eliminar a operação de acabamento em retífica, especificada para os eixos comando de válvulas em aço forjado, o acabamento na usinagem de torneamento do ADI grau 3, no estado beneficiado, também foi analisado. O ADI grau3 atendeu à solicitação de desgaste quando comparado ao aço forjado e obteve um acabamento na operação de usinagem em torno, muito próximo ao acabamento do aço forjado na operação de retífica. Os resultados deste trabalho servem como base de estudo para o desenvolvimento e a fabricação de eixo comando de válvulas em ferro fundido austemperado grau 3 para motores Diesel.

Palavras Chave: Ferro fundido; Válvulas.

Abstract

The austempered ductile iron grade 3 was investigated as a substitute to SAE 1045 forged steel quenched & tempered in Diesel engines camshaft application. The mechanical properties for both materials were compared in laboratory tests and in the literature. The main mechanical property studied was the wear resistance. The microstructure, chemical composition was analyzed and correlated to camshaft requirements. The finishing turning machining characteristic of heated treated ADI grade 3 also was tested to verify the possibility of eliminating the grinding operation to SAE 1045 forged steel. As a conclusion of this study the ADI grade 3 complied with wear requirements when compared to forged steel and reached a finishing turning machining very close to grinding operation on forged steel. The results of this study can be used as basis to new development and production of diesel engines camshaft with austempered ductile iron.

Key Words: Cast iron; Valves.

Lista de Ilustrações

1.1	Relação peso/tensão de escoamento ADI x (aço, alumínio e materiais ferrosos).	2
2.1	Sistema de acionamento do trem de válvulas.	5
2.2	Eixo comando de válvulas.	6
2.3	Ciclo típico Tempo x Temperatura do tratamento térmico da têmpera	9
2.4a	Ciclo Tempo x Temperatura do tratamento térmico da martêmpera	11
2.4b	Ciclo Tempo x Temperatura do tratamento térmico da austêmpera	11
2.5a	Microestrutura do ADI sem beneficiamento	12
2.5b	Microestrutura do ADI austemperado por 60 minutos	12
2.5c	Microestrutura do ADI austemperado por 200 minutos	12
2.6	Curva comparativa de desgaste entre o ADI, aço e outros materiais ferrosos (perda de volume x dureza)	14
2.7	Ciclo Tempo x Temperatura do tratamento térmico da austempera	15
2.8a	Detalhes da geometria da ferramenta de corte, superfícies, gumes, quinas e chanfros	17
2.8b	Detalhes da geometria da ferramenta de corte, principais ângulos	17
2.9	Componentes da força de usinagem no torneamento segundo norma DIN 6584	20
2.10	Usinabilidade relativa do ADI, aço e materiais ferrosos	23
3.1	Ferro fundido nodular perlítico sem beneficiamento	29
3.2a	Equipamento de tração/compressão Wolpert	30
3.2b	Detalhe da fixação do corpo de prova no ensaio de tração	30
3.3a	Tribômetro	31
3.3b	Detalhe do pino e disco no ensaio pino sobre disco	31
3.4a	Dimensão do pino para ensaio pino sobre disco	32
3.4b	Foto do pino para ensaio pino sobre disco	32
3.5	Posição do corpo de prova SAE 1045 no came do eixo comando de válvulas	33
3.6	Tucho	33
3.7a	Foto dos discos corpos de prova do ensaio pino sobre disco	34
3.7b	Fotos dos pinos corpos de prova do ensaio pino sobre disco	34

3.8	Balança analítica de precisão Ohaus	34
3.9	Durômetros ENCO	35
3.10	Equipamento para análise química SpectroMax	36
3.11	Equipamento Leco série CS 230 análise da porcentagem de carbono e enxofre	36
3.12	Microscópio óptico POLYVAR Reicheter-Jung.	37
3.13	Torno de controle numérico Romi E 280.	38
3.14	Rugosímetro portátil Mitutoyo SJ 201P.	40
4.1a	Micrografia fofo nodular aumento 100 x sem ataque	44
4.1b	Micrografia fofo nodular aumento 100 x com ataque	44
4.1c	Micrografia fofo nodular aumento 500 x com ataque	44
4.2a	Micrografia núcleo aço SAE 1045 ampliação 325x com ataque de Nital 3%	45
4.2b	Micrografia camada temperada aço SAE 1045 ampliação 100x com ataque de Nital 3%	45
4.3a	Micrografia ADI grau 3 ampliação de 100x sem ataque.	46
4.3b	Micrografia ADI grau 3 ampliação 100x com ataque de Nital 3%.	46
4.3c	Micrografia ADI grau 3 ampliação 500x com ataque de Nital 3%.	46
4.4	Foto Pino ADI G3 e disco Fofo cinzento coquilhado nitretado após teste	46
4.5a	Desgaste em massa dos pinos testados no ensaio pino sobre disco	48
4.5b	Desgaste em massa dos discos testados no ensaio pino sobre disco	49
4.6	Coeficiente de atrito dinâmico entre as superfícies testadas	50
4.7a	Acabamento na usinagem de torno Ra [μm] com ferramenta com raio de corte de 1,2 mm	51
4.7b	Acabamento na usinagem de torno Rz [μm] com ferramenta com raio de corte de 1,2 mm	51
4.8a	Acabamento na usinagem de torno Ra [μm] com ferramenta com raio de corte de 0,4 mm	52
4.8b	Acabamento na usinagem de torno Rz [μm] com ferramenta com raio de corte de 0,4 mm	52
4.9	Cavacos gerados em função dos parâmetros de corte empregados	54
5.1	Modelo de comando de válvula para teste em bancada.	56

Lista de Tabelas

2.1	Comparativo da dureza e energia de impacto do aço 1095 após os tratamentos térmicos da teêmpera, martêmpera e austêmpera	11
2.2	Propriedades mecânicas dos graus do ADI.	13
3.1	Propriedades mecânicas dos materiais estudados.	41
3.2	Composição química dos materiais analisados.	43
4.1	Resultados do teste pino contra disco para o pino em ADI grau 3	47
4.2	Resultados do teste pino contra disco para o pino em aço SAE 1045 temperado e revenido.	48

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

a_p – Profundidade de corte axial	[mm]
b - Largura de corte	[mm]
C_v - Vida para $V_c = 1\text{m/min}$	[constante]
f_z – Avanço por rotação	[mm/rotação]
F – Força de usinagem	[N]
F_c – Força de corte	[N]
F_{atc} – Força de Atrito dinâmico	[N]
h – Espessura de corte	[mm]
M_s – Temperatura de início de formação da martensita	
M_f – Temperatura final de formação da martensita	
N – Força normal	[Kg]
P_c – Potência de corte	[kW]
P_{ef} – Potência efetiva de corte	[kW]
r_e – Raio de quina	[mm]
R_a - Rugosidade média	[μm]
R_z - Rugosidade média	[μm]
T - Vida da ferramenta	[min]
V_c - Velocidade de corte	[m/min]

Letras Gregas

μm - micronmetro	[$\text{m} \times 10^{-6}$]
μ_c – coeficiente de atrito dinâmico	

Superescritos

k - coeficiente angular da curva de vida.

Abreviações

ADI – Austempered Ductile Iron d

AGI – Austempered Grey Iron

CADI – Carbide ADI

CFC – Cúbico de face centrada

HB – Escala de dureza Brinell

HRC – Escala de dureza Rockowell C

IADI – Intercritically Austenitized ADI

OHC – Over head camshaft

Siglas

ANSI – American National Standards Institute

ASTM – American Society for Testing and materials

CCM – Centro de Competência em Manufatura do ITA

DIN – Deutsches Institut für Normung

ISO – International Organization for Standardization

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

JIS – Japanese Industrial Standards

MWM – Motoren Werk Manhain do alemão ou fábrica de motores de Manhain

SAE – Society of Automotive Engineers

Equações

- | | | |
|---|---|----|
| 1 | Equação de Taylor para vida da ferramenta de corte [T]. | 18 |
| 2 | Força de atrito dinâmico [F_{atc}]. | 27 |

Sumário

1 Introdução	1
2 Revisão bibliográfica	4
2.1 Introdução ao motor à combustão interna	4
2.2 Fabricação de eixos de comando de válvulas	6
2.3 Tratamentos térmicos	8
2.3.1 Têmpera	8
2.3.2 Revenimento	9
2.3.3 Martêmpera	10
2.3.4 Austêmpera	10
2.4 O Ferro Fundido Austemperado	11
2.5 Conceitos de usinabilidade	16
2.6 Considerações sobre a usinabilidade do ADI	21
2.7 Coeficiente de atrito dinâmico	27
3 Materiais e métodos	29
3.1 Ensaio de Tração.	30
3.2 Ensaio de desgaste por escorregamento a seco tipo Pino sobre disco.	30
3.3 Ensaio de dureza.	35
3.4 Análise da composição química.	36
3.5 Análise Metalográfica	37
3.6 Usinagem	37
3.6.1 Máquina Ferramenta.	38
3.6.2 Ferramenta de corte e porta-ferramenta	39
3.6.3 Medida da rugosidade da superfície usinada Ra e Rz.	40
4 Resultados e discussões	41
4.1 Propriedades Mecânicas	41
4.2 Análise da composição química.	42
4.3 Microestrutura	44
4.4 Ensaio de desgaste por escorregamento a seco tipo pino sobre disco.	46

4.5 Análises dos testes de usinagem de acabamento	51
4.5.1 Rugosidade	51
4.5.2 Cavacos.....	53
5 Conclusão	55
6 Referências Bibliográficas.....	58

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo verificar a adequação e o desempenho do ferro fundido austemperado ADI grau 3 para a aplicação em eixo comando de válvulas de motores Diesel em substituição ao aço médio carbono forjado temperado e revenido.

Os testes executados neste trabalho verificam:

1 – Resistência ao desgaste do ADI grau 3 em comparação ao aço forjado SAE 1045 temperado e revenido com dureza de 59 Rocwell C quando trabalhando com a contra peça em ferro fundido cinzento coquilhado e nitretado através de ensaio de escorregamento pino sobre disco.

2 – Análise do acabamento na operação de torneamento com o objetivo de alcançar a rugosidade média R_z 2,0 μm , sem a necessidade da operação de retífica aplicada nas peças em aço forjado. A usinabilidade do ADI grau 3 é avaliada por meio de medição de potência consumida na usinagem de acabamento, formação dos cavacos e rugosidade da superfície usinada.

O motor Diesel é um dos itens de maior importância e valor de um veículo ou equipamento e não pode apresentar falha catastrófica durante a sua vida útil. A primeira retífica (reparo de maior monta que exige a remoção do motor e substituição de diversos componentes internos) deverá ocorrer após aproximadamente 10.000 horas ou 5 anos de trabalho.

Para eixos de comando de válvulas, as propriedades mecânicas mais desejáveis são a resistência à ruptura, a resistência ao desgaste e a resistência à fadiga [Nigro, 1993].

Como o eixo comando de válvulas é composto por um conjunto de ressalto (comes ou excêntricos) sobre um eixo, a resistência ao desgaste na superfície de contato entre o ressalto e o seguidor passa a ser o requisito mais significativo desta peça.

A competitividade acirrada da indústria automobilística e de equipamentos em geral incentiva a busca por novos materiais, novas ligas e novos processos que proporcionem a fabricação de componentes mais baratos e com desempenho igual ou superior aos já existentes.

O ferro fundido austemperado (ADI- de Austempered Ductile Iron) é um ferro fundido nodular obtido pelo tratamento térmico da austêmpera.

As pesquisas do ADI têm sido direcionadas para aplicações com requisitos específicos de resistência à fadiga e ao desgaste. O ADI pode apresentar maior resistência mecânica que os aços forjados com densidade 10% menor [10]. Em relação ao alumínio O ADI é 2,4 vezes mais pesado e 2,3 vezes mais resistente. O custo por unidade de massa do ADI é 20% menor que o do aço e 50% menor que do alumínio (figura 1.1) [Cakir, 2007; Keogh, 1998; Sorelmetal 1990].

Na aplicação em eixo de comando de válvulas para motores Diesel, o uso de peças fundidas em ADI permite liberdade de criação de peças com geometrias complexas com menor peso e por conseqüência menor inércia e menor consumo de combustível. No quesito fabricação, permite a eliminação de operações de usinagem devido ao perfil da peça bruta estar próximo ao perfil da peça acabada e conseqüente menor tempo de usinagem.

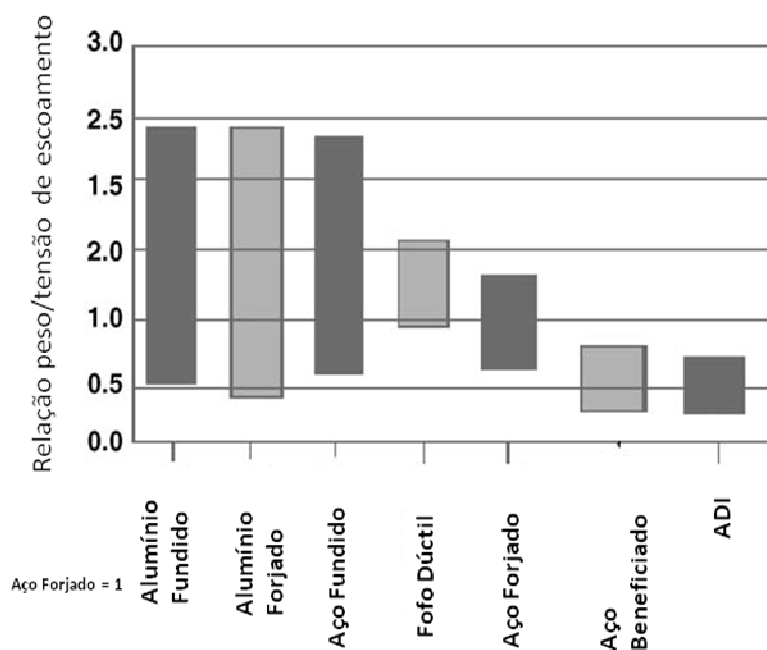


Figura 1.1: Relação entre a unidade de peso e a tensão de escoamento, comparativo entre alumínio fundido, alumínio forjado, aço fundido, ferro fundido dúctil, aço forjado, aço beneficiado e o ADI [Cakir,2007].

A utilização do ferro fundido austemperado, ADI Grau 3 torna possível a padronização do material de eixos comando de válvulas, originalmente fabricados em aço forjado, em barra de aço usinada, em ferro fundido coquilhado e em ferro fundido nitretado. Esta unificação possibilita o

aumento de volume no fornecedor e a criação de uma célula de manufatura dedicada a este componente.

Os investimentos em modelos de fundição são relativamente menores que os investimentos em ferramentais de forjaria, possibilitando uma escala de produção menor para a amortização dos investimentos.

A usinagem preliminar separada e associada a recursos de transporte para atingir locais distantes da zona de tratamento térmico são fatores que incentivam a busca pela usinagem completa no estado beneficiado [Gomes, 2008]. Este é um desafio que deve considerar o esforço conjunto entre a fundição, o tratamento térmico e a usinagem.

Atualmente a MWM-International Indústria de motores da América do Sul possui em sua linha de produtos eixos comando de válvulas para atender à 7 famílias de motores em produção.

Desse modo, o estudo da aplicação de ADI em seus produtos, bem como sua relação com o processo de usinagem são pontos de importância a serem considerados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução ao motor à combustão interna

O motor a combustão interna é uma máquina térmica que transforma a energia térmica da combustão de um combustível (poder calorífero) em energia mecânica que é disponibilizada na forma de torque em um eixo giratório [Nigro, 1993].

No motor Diesel a combustão da mistura ar + combustível dentro da câmara de combustão ocorre espontaneamente devido ao aumento da pressão e da temperatura do ar admitido e comprimido dentro dos cilindros pelos pistões. Próximo ao curso máximo do pistão o ar atingirá temperatura e pressão suficientes para que o combustível inicie a sua combustão espontânea, momento este onde o combustível é injetado. O movimento dos pistões impulsionados pela expansão dos gases no instante da combustão é que gerará a energia mecânica que é transmitida ao eixo da árvore de manivelas.

O sistema do trem de válvulas controla o fluxo de entrada e saída dos gases nos cilindros de um motor. O trem de válvulas é composto por: eixo comando de válvulas, seguidores dos ressaltos do eixo comando de válvulas, que podem ser tuchos ou balanceiros, válvulas de admissão e de escapamento, guias de válvulas, sedes de vedação das válvulas e molas de retorno das válvulas [Nigro, 1993].

A árvore de comando de válvulas utiliza ressaltos (chamados excêntricos ou cames), quando esta gira aciona os seguidores que estão em contato com as válvulas forçando-as a abrirem; molas nas válvulas as empurram-nas de volta para a posição fechada. Este trabalho tem grande impacto no desempenho e na emissão de poluentes dos motores à combustão interna.

As válvulas de admissão permitem a entrada do ar (motores de ciclo Diesel) para dentro do cilindro do motor onde será comprimido e misturado com o combustível pulverizado.

As válvulas de escapamento possibilitam a saída dos gases, produtos da combustão.

Todo o trem de válvulas deve operar em sincronismo com os demais componentes do motor (figura 2.1) [Dictionary of automotive terms].



Figura 2.2. Ilustração de um eixo comando de válvulas.

2.2 Fabricação de eixos de comando de válvulas

- Eixos comando de válvulas usinados a partir de uma barra de aço trefilado SAE 1045 seguem a seguinte seqüência de processos de fabricação:
 1. Operação em uma serra de fita: corte da barra trefilada no comprimento adequado para a usinagem da peça final.
 2. Operação em torno: faceamento das extremidades; usinagem do furo de centro; desbaste no diâmetro externo; desbaste dos seguimentos intermediários entre os comes e os mancais de apoio.
 3. Operação em máquina especial (torno adaptado com perfil seguidor): usinagem do perfil dos comes.
 4. Tratamento térmico de têmpera por indução para o endurecimento da superfície.
 5. Revenimento para o alívio das tensões geradas pelo tratamento térmico.
 6. Operação de retificação: dos mancais de apoio e dos comes.

As vantagens deste processo são a não são necessidade de investimentos em ferramentas de forjaria ou modelos de fundição, início de fabricação mais rápido e é um processo mais adequado à pequenas escalas de produção.

As desvantagens deste processo são maior tempo de usinagem, maior desperdício de matéria prima, maior consumo de insumos como eletricidade e de ferramentas de usinagem. Além disso, as peças possuem menor resistência mecânica quando comparada à peça forjada onde as linhas de

dobra do material acompanham o perfil externo da peça e a matéria prima é mais cara que o ferro fundido.

- Os eixos usinados a partir de uma barra de aço forjado SAE 1045 são produzidos pela seguinte seqüência de processos de fabricação:

1. Operação em uma serra de fita: corte da barra trefilada no comprimento da peça final.
2. Operação de forjamento do bruto do eixo comando que poderá ser em uma única operação ou em múltiplas batidas, dependendo da complexidade do perfil da peça.

As demais operações seqüenciais são semelhantes às descritas no processo anterior, itens 2 a 6.

As vantagens associadas deste processo são menor tempo de usinagem, menor desperdício de matéria prima, menor consumo de insumos como eletricidade e ferramentas de usinagem, maior resistência mecânica quando comparado à peça usinada em barra de aço devido as linhas de dobra do material seguirem o perfil da peça..

As desvantagens deste processo são a necessidade de investimentos em ferramentas de forjaria, o início de fabricação mais demorado, a matéria prima é mais cara que o ferro fundido e maior complexidade logística, pois nem sempre o centro de usinagem está próximo a forjaria e a beneficiadora.

- Os eixos comando de válvulas em ferro fundido seguem a seguinte seqüência de processos de fabricação:

1. Operação de fundição: o ferro fundido é vazado no molde da peça.

As demais seqüências são idênticas as descritas anteriormente. Difere o tratamento térmico de nitretação para o endurecimento da superfície. Quando o processo é de fundição do tipo coquilha, o tratamento térmico ocorre diretamente no resfriamento do ferro fundido dentro do molde de fundição.

As vantagens deste processo são menor tempo de usinagem, menor desperdício de matéria prima, matéria prima mais barata que a do aço forjado, menor consumo de insumos como eletricidade e ferramentas de usinagem, menor peso da peça quando comparada ao aço.

As desvantagens deste processo são a necessidade de investimentos em ferramentas de moldes de fundição e a resistência mecânica inferior que a do aço forjado. Além disso, considera-se também a maior complexidade logística, pois nem sempre o centro de usinagem está próximo a forjaria e a beneficiadora.

2.3 Tratamentos térmicos

2.3.1 Têmpera

A tempera consiste em resfriar o aço (austenita), a partir de uma temperatura de austenitização, a uma velocidade suficiente rápida (água, salmoura, óleo ou ar forçado) para evitar as transformações perlíticas e bainíticas na peça em questão. Essa velocidade de resfriamento dependerá da posição das curvas em C, ou seja, do tipo do aço e da forma e dimensões da peça. Figura 2.3.

Deste modo obtêm-se a estrutura martensita com dureza entre 60 a 67 HRC que é uma solução sólida supersaturada em carbono com reticulado TCC (tetragonal de corpo centrado).

O objetivo da têmpera é:

- Aumentar a dureza,
- Aumentar a resistência mecânica (limites de escoamento e resistência) e
- Melhorar a resistência ao desgaste.

Entretanto, a ductilidade e a tenacidade dos aços temperados são drasticamente reduzidas após o tratamento térmico da têmpera.

Depois da tempera com a formação da martensita, o material apresenta níveis de tensões interna muito altos, devido ao resfriamento drástico e pela brusca mudança de fases, a peça ou parte dela poderá apresentar empenamento ou fissuras devido ao resfriamento não uniforme. A parte externa esfria mais rapidamente, transformando-se em martensita antes da parte interna. Durante o curto tempo em que as partes externa e interna estão com diferentes microestruturas, aparecem tensões mecânicas consideráveis. A região que contém a martensita é frágil e pode trincar então imediatamente após a têmpera, é preciso que essas tensões sejam aliviadas ou eliminadas através de outro tratamento térmico o revenimento, para devolver ao aço o equilíbrio necessário. (tratamentos térmicos – Laboratório, Escola federal de Engenharia Itajubá.) Os

tratamentos térmicos denominados de martempera e austempera vieram para solucionar este problema [Canale].

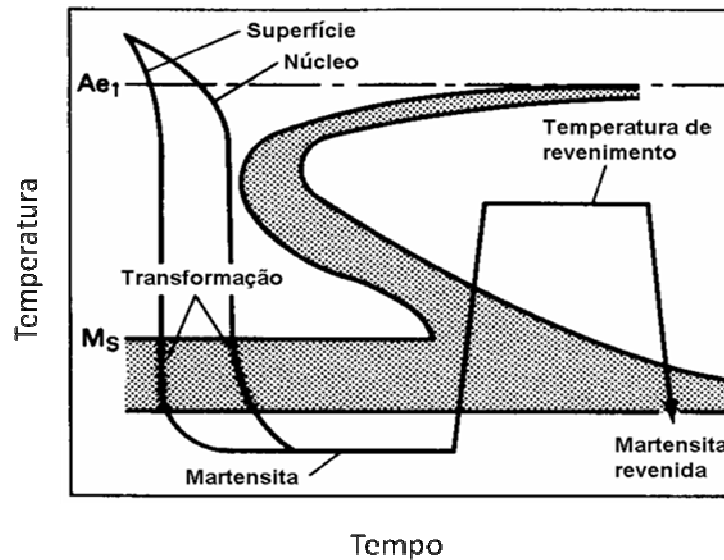


Figura 2.3 Ciclo típico Tempo x Temperatura do tratamento térmico da têmpera.

2.3.2 Revenimento

Este tratamento consiste em aquecer uniformemente o material até a temperatura abaixo da austenitização, mantendo-o nesta temperatura por tempo suficiente para completa homogeneização da temperatura, com o objetivo de aliviar as tensões residuais internas.

Dependendo da temperatura, podem ocorrer pequenas ou grandes alterações nas estruturas martensíticas [Tratamentos térmicos].

2.3.3 Martêmpera

A martêmpera é um tipo de tratamento térmico indicado para aços ligados por que reduz o risco de empenamento das peças, visando a obtenção da martensita.

Ela consiste em aquecer o aço até a temperatura de austenitização, e então resfriar rapidamente (sem atingir a curva TTT do aço), chegando assim à temperatura de formação da martensita, nesta temperatura é deixado isotérmico por certo tempo, o resfriamento é temporariamente interrompido, criando um “passo isotérmico”, no qual toda a peça atinja a mesma temperatura, seguido pelo resfriamento até a temperatura ambiente que é feito lentamente de forma que a martensita se forma uniforme e homogeneamente através da peça, diminuindo riscos e trincas.

Após a martêmpera é necessário submeter a peça a um revenimento final para a obtenção da ductilidade Figura 2.4a [Tratamentos térmicos].

2.3.4 Austêmpera

O tratamento térmico denominado austêmpera se apresenta como mais uma alternativa para evitar distorções e trincas. Neste processo o procedimento é análogo à martêmpera, entretanto a fase isotérmica é prolongada até que ocorra a completa transformação em bainita, figura 2.4b.. Como a microestrutura formada é mais estável ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$), o resfriamento subsequente não gera martensita. Não existe a fase de reaquecimento, tornando o processo mais barato [Canale].

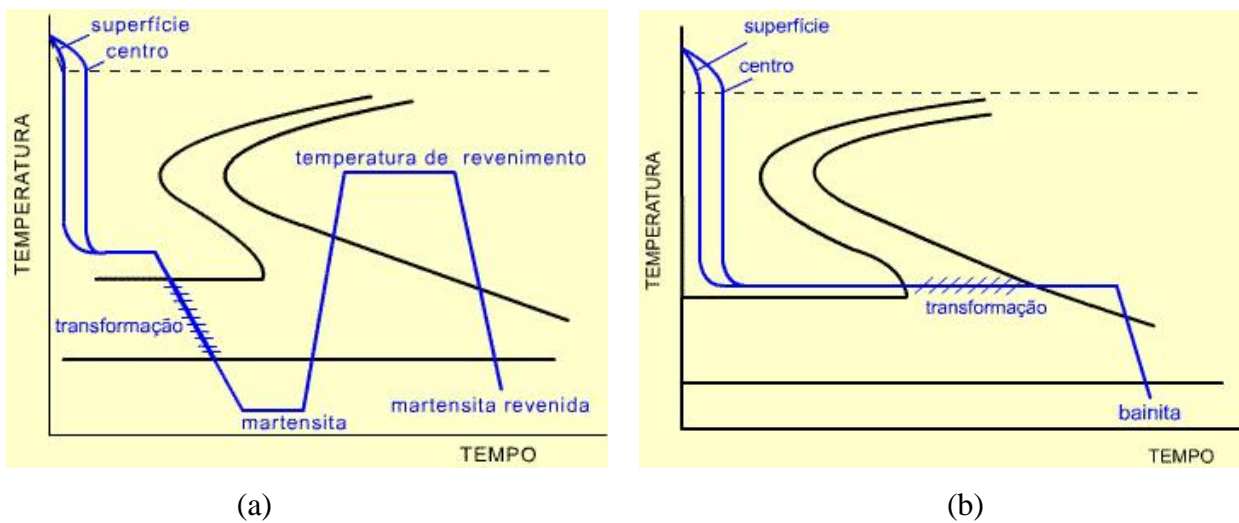


Figura 2.4 Ciclo Tempo x Temperatura do tratamento térmico da martêmpera (a) e da austêmpera (b).

Tabela 2.1 Resultados comparativos de dureza e energia absorvida no impacto para o aço ABNT 1095, após a realização da têmpera, martêmpera e austêmpera [Chiaverini, 1987; Gallego, 2009].

Tratamento Térmico	Dureza (HRC)	Impacto (J)
Temperado em água e Revenido	53,0	15,7
	52,5	18,6
Martemperado e Revenido	53,0	37,3
	52,8	32,4
Austemperado	52,0	61,1
	52,3	54,3

2.4 O Ferro Fundido Austemperado

O ferro fundido austemperado, ADI é um material que se destaca pela alta estabilidade, alta resistência ao desgaste e forte tendência ao endurecimento e grande tenacidade sendo que a

resistência e o alongamento à ruptura variam dentro de amplos limites, de acordo com os parâmetros do tratamento térmico [Hayrynen, 2002; Jonsson, 1994; Myszka; Modern Casting, 1995; Word conference in ADI 1991].

A microestrutura do ADI consiste em uma camada muito fina de ferrita acicular e austenita estabilizada de alto teor de carbono (esta combinação também é denominada de ausferrita), e não é similar a nenhum dos materiais ferrosos convencionais. A forma conhecida da grafita é a nodular (figura 2.5) [Hayrynen, 2002; Keough, 2002].

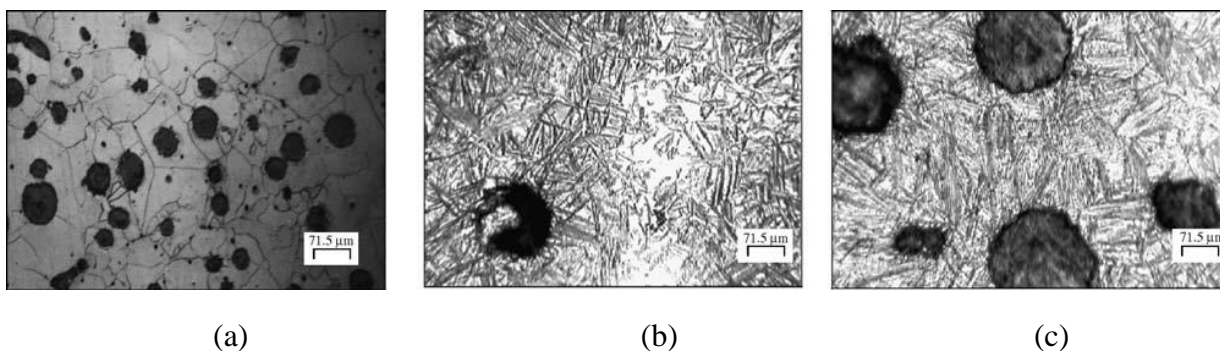


Figura 2.5. Microestrutura do ADI sem beneficiamento (a), austemperado por 60 minutos (b) e 200 minutos (c) (ataque de nital 2%, 400x) [Hayrynen, 2007].

O ferro fundido austemperado é classificado segundo a norma ASTM A897-897M em graus de 1 a 5 e DIN EMN 1564 (GJS-800-8, GJS-1000-5, GJS-1200-2 e GJS-1400-1). Para cada grau têm-se propriedades mecânicas distintas (tabela 3.1).

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas dos graus do ADI Segundo ASTM A897-897M e DIN 1564.

(1) valores mínimos. (2) corpo de prova Charpy não entalhado a 22 +/- 4 °C.

Propriedades Mecânicas do ADI							
Grau ASTM 897/897M	Classificação DIN EN 1564	Tensão de Ruptura [Mpa] ⁽¹⁾	Tensão de Escoamento [Mpa]	Alongamento [%]	Energia de Impacto [J] ⁽²⁾	Dureza [Rockwell C]	
						Min.	Max.
***	GJS-800-8	800	500	8	***	26	34
1	***	850	550	10	100	28	34
***	GJS-1000-5	1000	700	5	***	32	38
2	***	1050	700	7	80	32	38
***	GJS-1200-2	1200	750	2	***	36	46
3	***	1200	850	4	60	36	46
***	GJS-1400-1	1400	1100	1	***	40	49
4	***	1400	1100	1	35	38	49
5	***	1600	1300	***	***	46	55

A excelente resistência do ADI ao desgaste é atribuída à transformação, sob deformação, da austenita (retida) de alto carbono em martensita que ocorre na camada superficial durante a solicitação à abrasão/compressão (deformação plástica) [Lerner, 1998].

O ferro fundido austemperado, devido às suas propriedades mecânicas permite substituir o ferro fundido nodular, o aço fundido e o aço forjado.

As propriedades de fadiga, resistência ao desgaste, absorção e menor emissão do ruído e elevada tensão de ruptura do ADI permitem a sua aplicação em engrenagens, peças estruturais de baixo peso e peças com menor emissão de ruído quando comparado ao aço.

Devido a sua elevada resistência ao desgaste, o ADI é utilizado na fabricação de componentes da indústria de mineração como dentes de pás e caçambas de escavadores, rodas motrizes de esteiras rodantes, etc.

A dureza do ADI grau 3 pode atingir 46 HRC. Apesar de estar abaixo da dureza atual requisitada 57+/-4 HRC para eixos de comando de válvulas em aço SAE 1045 temperado e revenido, atende ao requisito de resistência ao desgaste (figura 2.6) da aplicação [Hayrynen, 2007].

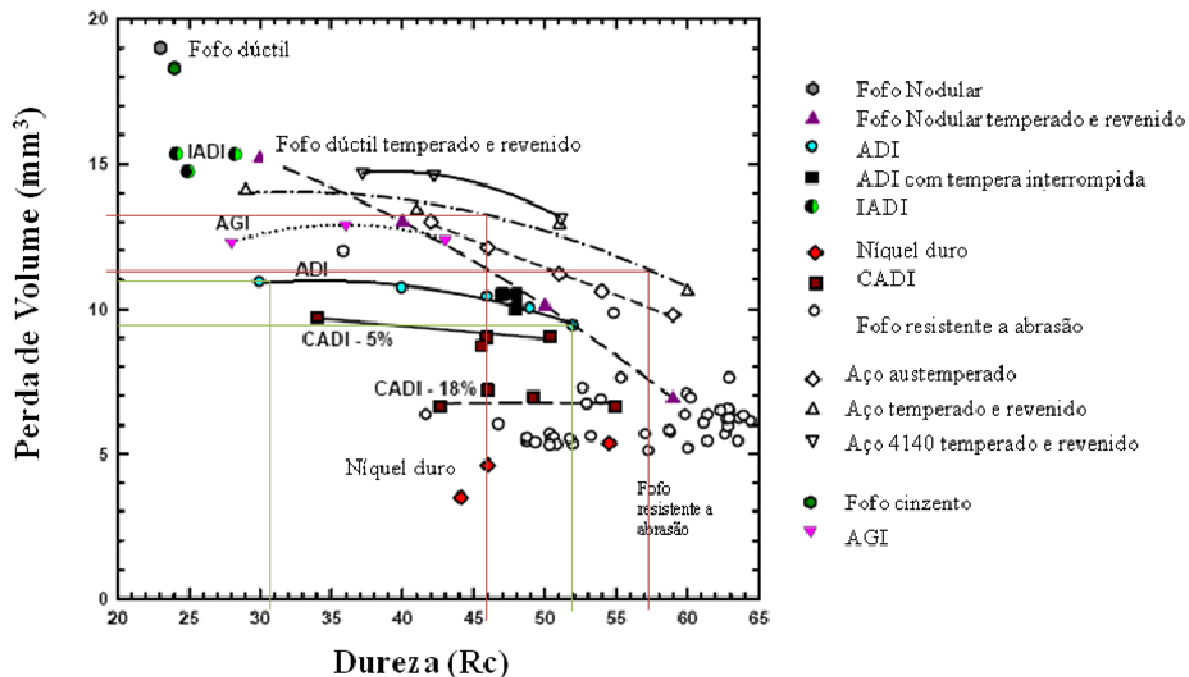


Figura 2.6. Ensaio comparativo de abrasão em pino para o ADI, aço e ferro fundido. Perda de volume em mm³ x dureza Rc [Hayrynen, 2007].

A obtenção das propriedades mecânicas do ADI ocorre por meio de tratamento térmico da austêmpera. Este processo isotérmico baseia-se no conhecimento das curvas em C e aproveita as transformações da austenita que podem ocorrer a temperatura constante [Chiaverini, 1996; Hayrynen, 2002]. A figura 2.7 apresenta o processo de austêmpera com suas respectivas etapas.

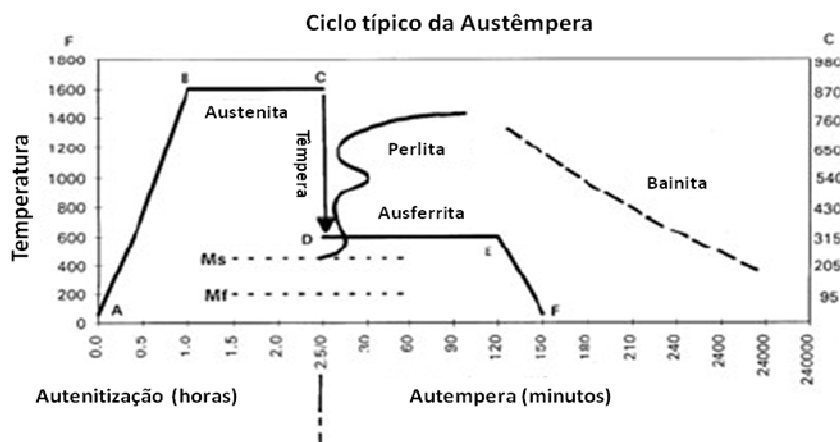


Figura 2.7: Ciclo Tempo x Temperatura do tratamento térmico da austêmpera [Hayrynen, 2002].

a. Etapa de aquecimento até a temperatura de austenitização (A-B).

Geralmente esta temperatura é de 790°C a 915°C [Chiaverini, 1996]. A escolha da temperatura é dependente da composição química, que determinará a presença de fase austenita+grafita. Elementos como silício aumentam a temperatura, enquanto que o manganês a diminui. A escolha da temperatura não adequada ao material da liga acarretará na presença de ferrita proeutetóide, diminuindo a resistência mecânica e dureza [Hafiz, 2008; Hayrynen, 2002].

b. Etapa de austenitização (B-C).

Nesta etapa o material aquecido é mantido em temperatura constante (790 °C a 915 °C) pelo período de tempo necessário para a produção da austenita. O tempo de austenitização dependerá também da composição química, que determinará a presença da matriz austenítica saturada de carbono [Hayrynen, 2002; Lin, 2002].

c. Etapa de resfriamento até a temperatura de austêmpera (C-D).

Esse processo ocorre num banho mantido a uma temperatura constante, geralmente entre 260°C e 400°C [Ahmadabadi, 1997; Chiaverini, 1996; Hayrynen, 2002; Lahres, 2006], nesta faixa de temperatura é formada a microestrutura específica da ausferrita com a proporção desejada de austenita e ferrita. Esta etapa deve ser completada rapidamente de modo a evitar a formação de perlita que diminui o alongamento e a tenacidade [Hayrynen, 2002].

d. Tratamento térmico isotérmico na temperatura de austêmpera (D-E).

Esse processo ocorre com permanência no banho na temperatura definida pela operação anterior, para se ter, isotermicamente, a transformação da austenita em bainita [Druschitz, 2003].

A faixa de temperatura é de 238°C a 399°C. Quanto menor o grau de ADI escolhido, maior a temperatura de tratamento isotérmico [Hayrynen, 2002, Lin, 2002].

e. Resfriamento até temperatura ambiente em ar tranquilo ou banho de sal (E-F).

As estruturas bainíticas resultantes da austêmpera apresentam as seguintes vantagens:

Melhores: ductilidade, tenacidade, devido à presença da austenita (estrutura CFC) e resistência, para uma determinada dureza, devido ao tamanho reduzido da ferrita acicular e do carboneto precipitado. Empenamento reduzido, o que reduz o tempo posterior de usinagem, sucata e inspeção [Chiaverini, 1996; Lerner, 1998].

Uma ampla gama de propriedades mecânicas pode ser desenvolvida para o ADI através da adequada seleção da temperatura e do tempo da austêmpera. Existe um considerável interesse no ferro fundido austemperado na faixa de temperaturas entre 325 e 400 °C . Esta família de ADI apresenta elevada tensão de ruptura, tenacidade e resistência ao desgaste [Druschitz, 2003].

2.5 Conceitos de usinabilidade

Em todos os processos de usinagem, as características do processo, como formação e saída de cavaco, força de corte, desgaste e resultado de trabalho, são influenciadas consideravelmente pela geometria da ferramenta (figura 2.8), esta deve ser adaptada ao material da peça, ao material da ferramenta e as condições específicas da máquina-ferramenta [Ferraresi, 1977].

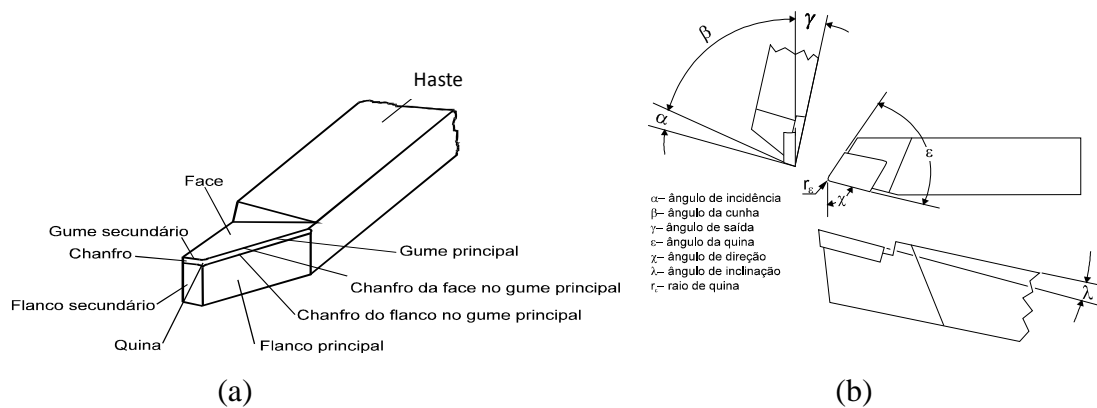


Figura 2.8 Detalhes da geometria da ferramenta de corte (a) superfícies, gumes, quinas e chanfros (b) principais ângulos.

A usinabilidade de um metal pode ser definida como um índice que expressa por meio de um valor numérico comparativo um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão. Entendem-se como propriedades de usinagem de um metal aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais, tais como vida da ferramenta, força de usinagem, acabamento da peça, temperatura de corte, produtividade e características do cavaco [Ferraresi, 1977].

Os fatores que influem na determinação do índice de usinabilidade dos metais são: material da peça (composição química, micro-estrutura, dureza, propriedades mecânicas, rigidez da peça); processos mecânicos e condições de usinagem (material e geometria da ferramenta, condições de trabalho, fluido de corte, rigidez da máquina-ferramenta e do sistema de fixação, tipo de operação a ser realizada) [Ferraresi, 1977].

Para avaliação da usinabilidade são utilizados quatro critérios, isoladamente ou em conjunto [Ferraresi, 1977]:

- vida da ferramenta;
- acabamento da superfície usinada;
- formação de cavacos (forma e tamanho dos cavacos) e
- força de usinagem.

a) Critério vida da ferramenta:

Como critério de fim de vida da ferramenta, pode ser usado: o tempo de corte, o volume do material cortado ou número de peças fabricadas.

Em uma operação de usinagem, o desgaste da ferramenta de corte é influenciado por uma série de fatores como: material da peça, material da ferramenta, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Há uma interdependência destes fatores, que precisa ser determinada.

A vida da ferramenta é normalmente o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material. A vida “T” é o tempo mínimo que uma ferramenta resiste do início do corte até sua utilização total, e é definida através da equação de Taylor [Weingaertner, 1991].

$$T = v_c^k \cdot C_v \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

T = vida da ferramenta (min);

v_c = velocidade de corte (m/min);

C_v = vida para $v_c = 1\text{m/min}$ (constante);

k = coeficiente angular da curva de vida.

Os fatores mais importantes para aparecimento de desgaste na ferramenta são as partículas duras e abrasivas da peça, bem como as propriedades mecânicas da estrutura da matriz, além do material da ferramenta empregado [Weingaertner, 1991].

b) Critério qualidade da superfície usinada:

A qualidade da superfície usinada é determinada em função da precisão dimensional e da rugosidade da superfície. Ambas são baseadas na tolerância pré-fixada da peça. Um material de maior resistência mecânica associado a uma maior velocidade de corte permite a obtenção de peças com melhor acabamento superficial. Se o material é de pequena resistência ou a velocidade

de corte muito baixa, o material será arrancado durante a operação de usinagem e a peça apresentará em sua superfície uma série de micro trincas [Field, 1963].

c) Critério formação de cavaco:

A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente para os processos de usinagem, onde há pouco espaço para os cavacos (furação, fresamento, etc.) ou em máquinas-ferramentas com pouco espaço de trabalho, como tornos automáticos e de comando numérico [Jawahir, 1993].

Três tipos básicos de cavaco existem:

- arrancado,
- cisalhado e
- contínuo.

Além disso, cavacos podem ser diferenciados quanto a sua forma em [Stahl]:

- cavaco em fita,
- helicoidal,
- espiral e
- em lascas ou pedaços.

Certas formas dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e influem no desgaste da ferramenta [Ferraresi, 1977].

As principais influências sobre a formação dos cavacos são as condições de corte, a geometria da ferramenta e, por parte do material da peça, a deformabilidade, a tenacidade e a resistência ou estado metalúrgico do material [Stemmer, 1989].

d) Critério força de corte:

A força que atua sobre uma cunha de corte durante a usinagem é denominada força de usinagem (F) figura 2.9. A potência efetiva de corte (P_{ef}) é a potência que necessariamente deve

estar disponível na quina da ferramenta para ser consumida na operação da remoção de cavacos, é dada pela soma das potências de corte e de avanço.

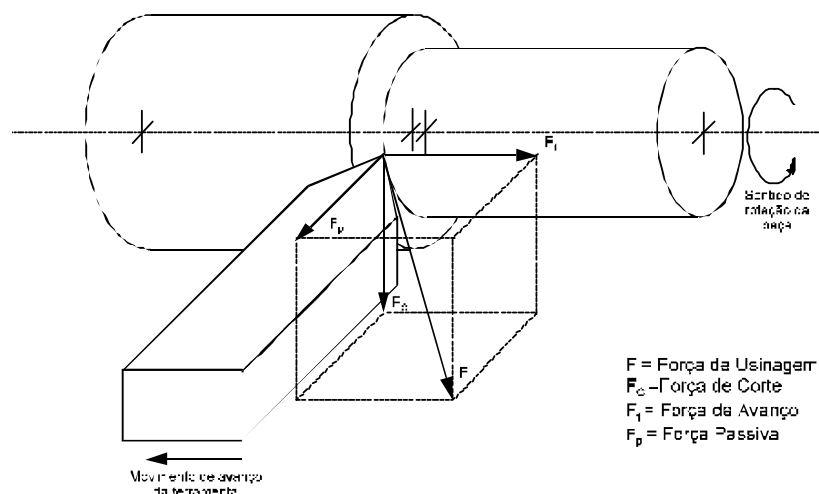


Figura 2.9 Componentes da força de usinagem no torneamento, nos planos de trabalho e efetivo de referência, segundo a norma DIN 6584.

A potência de corte (P_c) é resultante da soma das parcelas referentes à potência de cisalhamento (requerida para deformar plasticamente o cavaco na zona de deslizamento e cisalhamento) e a potência de atrito (necessária para vencer as resistências de atrito entre cavaco e ferramenta). É dada pelo produto da força de corte (F_c) pela velocidade de corte (v_c).

A força de usinagem sofre influência da composição química, do tratamento térmico e da estrutura da matéria bruta a ser usinada [Society of manufacturing engineers, 1983]. Como uma primeira aproximação, pode-se dizer que a força necessária para a usinagem de um material aumenta com a dureza do mesmo [Ferraresi, 1977].

O aumento do avanço f e da profundidade de corte a_p através da espessura de corte h e da largura de corte b aumentam as componentes da força de usinagem (só vale se a_p for maior que r_e). Para velocidade de corte (v_c), verifica-se que a força de corte diminui com o aumento da velocidade.

2.6 Considerações sobre a usinabilidade do ADI

As pesquisas sobre a usinabilidade de materiais ferrosos convencionais geralmente tratavam dos mecanismos de usinagem relativamente à forma da grafita e dos componentes da microestrutura, da aptidão e do comportamento ao desgaste dos diversos materiais de corte, da possibilidade de usinagem a seco e do problema da emissão de particulados.

Os materiais investigados foram o ferro fundido cinzento, branco, nodular e o ferro fundido coquilhado. Nos últimos tempos, também foram registradas análises mais intensivas de ferro fundido vermicular, por causa da demanda crescente por materiais com maior resistência.

Para os ferros fundidos convencionais, as propriedades de usinagem são influenciadas de modo acentuado pela quantidade e a conformação da grafita que, por um lado, reduz a fricção entre a ferramenta e a peça e, por outro, interrompe a continuidade da matriz da microestrutura metálica básica [Myszka; Moore, 2003].

Geralmente, essa interrupção resulta na facilidade de usinagem e reciclagem em comparação com o aço (que não possui grafita na sua composição) e gera cavacos na forma de espirais contínuas, com conseqüente necessidade de maiores forças de usinagem [Brandenberg, 2002].

As diferenças entre os grupos de materiais ferrosos ocorrem em virtude da forma e do tamanho da grafita, e dos diferentes processos e ferramentas de corte. Uma vez que o efeito de entalhe interno depende da forma da grafita, ocorre alteração do tipo de ruptura dos cavacos e das solicitações mecânicas e térmicas das ferramentas. Adicionalmente, as propriedades de usinagem são influenciadas pela composição da liga, o que também influencia a forma da grafita [Myszka; Moore, 2003].

Além da forma e do tamanho da grafita, a microestrutura metálica básica também exerce uma grande predominância sobre a usinagem. Os nódulos de grafita influenciam na força de corte e no acabamento superficial enquanto a matriz metálica determina a vida da ferramenta de corte

[Ductile Iron Data For Desing Engineer, 2001; Seker, 2005].

Com uma proporção crescente de perlita a resistência do material aumenta, provocando principalmente maior desgaste da ferramenta.

As investigações mais detalhadas sobre a usinagem do ferro fundido austemperado foram publicadas principalmente no final dos anos 1980 e no início dos anos 1990. As informações contidas na literatura, entretanto, raramente descrevem os mecanismos de usinagem desse material. Nestes casos, em parte os resultados apresentam contradições pontuais ou foram obtidos com o uso de ferramentas e materiais de corte que já ficaram ultrapassados.

Existe diferença significativa de usinabilidade para distintos tipos de ADI. Os graus 1, 2 e 3 são aqueles utilizados para componentes de suspensão e demais aplicações dinâmicas e são os atualmente usinados dentro de conceitos de produtividade [Manufacturing Engineering, 2002; Modern Casting, 1995; Reuter, 2002], ou seja, utilizando máquinas operatrizes e ferramentas de corte disponíveis no mercado a preços competitivos e tempos adequados de operação. Os de graus 4 e 5 são considerados de maior resistência ao desgaste, devido suas elevadas durezas, no entanto, com sérios desafios de usinabilidade.

Os resultados contraditórios podem ser atribuídos especialmente às composições variadas das ligas e às diferentes técnicas de tratamento térmico. As concentrações de martensita resultantes de segregações e os tempos críticos imprecisos durante o tratamento térmico podem reduzir a possibilidade de usinagem de modo extremo.

Avaliações positivas da usinagem do ADI, em comparação com o aço temperado e revenido, são atribuídas muitas vezes à presença da grafita na estrutura básica. Dados de manufatura da General Motors mostram uma sobrevida da ferramenta de corte entre 20 a 900% [Seker,2005].

As publicações [Ahmadabadi, 1997, Klocke, 2007; Lerner, 1998; Moncada, 1998;Seker, 2005], por outro lado, também indicam parcialmente a alta resistência ao desgaste do material e uma possível transformação da estrutura de austenita. Essa transformação está associada à formação de martensita e é classificada como de risco para os processos de usinagem. Conforme a figura 2.10, a usinabilidade do ADI grau 1 é comparável à do aço 4141 de mesma dureza [Ductile Iron Data For Desing Engineer, 2001].

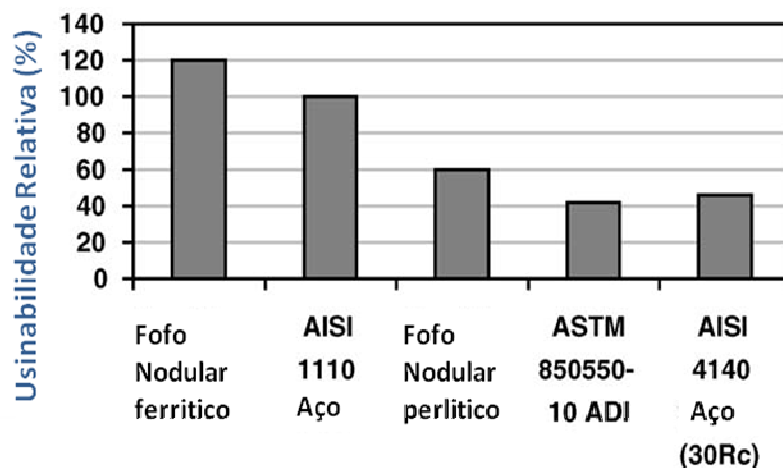


Figura 2.10. Usinabilidade relativa entre ADI grau 1, aço e alguns materiais ferrosos
[Ductile Iron Data For Desing Engineer, 2001].

Em termos de composição da liga, atualmente é permitido, por exemplo, teores de molibdênio entre 0,2% e 0,8%. Como já mencionado, os resultados nessas condições periféricas não permitem uma avaliação conclusiva, já que a atual relação do composto é muito alta.

Fatores parecidos podem ser adotados em caso de tempos variáveis no estágio intermediário de beneficiamento, que devem ser determinados e considerados como problemáticos, já que uma microestrutura austenítica não suficientemente estabilizada pode dar origem à martensita.

Resultados atuais de ensaios da usinabilidade de ADI descrevem os diversos efeitos da usinagem de um tipo de ADI de alta ductilidade com diferentes materiais cerâmicos de corte. Entre esses materiais incluem-se a cerâmica de alumina e a cerâmica mista (dentro da categoria de boa qualificação), e a cerâmica de nitreto de silício (qualificação insuficiente).

Os primeiros resultados sobre análises comparativas com diferentes tipos de ADI podem ser encontrados no trabalho de Moncada [Moncada, 1998] e outros. Goldberg e outros descrevem alguns critérios de usinagem para o ADI-1200 [Goldenbrg, 2005].

As informações existentes sobre a usinagem de ADI ainda estão longe de serem suficientes. Elas devem ser avaliadas com cuidado, em virtude das condições periféricas indicadas.

A velocidade de corte deve ser otimizada, para diminuir custos ou o tempo de usinagem. Com o aumento da velocidade de corte, têm-se como desvantagens o aumento na potência de corte e a diminuição da vida da ferramenta [Stemmer, 1989].

A velocidade de corte para o ADI deve ser levemente reduzida, em comparação com a usada na usinagem do ferro fundido nodular perlítico. A influência da velocidade de corte no torneamento é especialmente grande e influencia na vida da ferramenta.

Com a elevação do avanço são obtidos cavacos de maior espessura. Contudo, o avanço é limitado pela resistência estrutural da ferramenta. É necessário, portanto, que se faça um estudo prévio do avanço a ser utilizado, pois com avanços muito elevados tem-se uma provável ruptura do gume da ferramenta. Para avanços demasiadamente pequenos a ferramenta patina e vibra, aumentando a geração de calor [Stemmer, 1989].

O avanço não deve ser menor do que 0,1 mm/rot., a fim de se evitar o corte de regiões encruadas pelo passe anterior [Weingaertner, 1995].

A profundidade de corte deve ser tão grande quanto permitem os limites do equipamento, da peça e da ferramenta de corte. É usual definir profundidades de corte maiores que 0,6 mm para operações de desbaste e menor que 0,6 mm para operações de acabamento [Weingaertner, 1991]. Os valores de rugosidade superficial encontrados na operação de torneamento do ADI sugerem a eliminação da operação de retífica para diversas aplicações [Seker, 2005].

No ADI, a profundidade de corte e o avanço devem ser escolhidos para que a ferramenta trabalhe abaixo da superfície endurecida pelo encruamento do passe anterior.

A profundidade de corte, como regra geral, deve ser de no mínimo 1 mm. A profundidade de corte, para vários passos seguidos, deve variar para se evitar um desgaste excessivo na quina da ferramenta [Sorelmetal, 1990].

Os processos de fabricação com corte contínuo (por exemplo, o torneamento, a furação, o rosqueamento) devem ser realizados, em princípio, com fluido lubrificante, em virtude das temperaturas de usinagem mais altas no ADI.

Os fluidos de corte entram nesse contexto com a tarefa de reduzir os custos de usinagem desse material pela redução do desgaste da ferramenta e melhoria da superfície do componente fabricado [Zabala, 1981].

A característica mais importante em uma máquina-ferramenta para a usinagem do ADI é a sua rigidez em operação, como solução para erradicar eventuais vibrações. Por isso o

projeto de uma máquina ferramenta deve possuir:

- Estrutura com grande momento de inércia em relação à peça a trabalhar.
- Boa fixação à base, se possível com pinos e juntas de materiais absorventes de vibrações.
- O melhor ajuste possível dos componentes dinâmicos da máquina, como correto balanceamento de engrenagens e polias, engrenamento correto, ausência de folgas nos mancais, rigidez da árvore principal.

O Laboratório de Máquinas-ferramenta da Universidade Técnica de Aachen (Alemanha) trata da usinagem de ADI desde 1998. Em projeto patrocinado pela União Européia foram obtidos resultados fundamentais sobre a usinagem de um ADI do tipo VER-GJS-900-7, produzido em escala industrial. Esse ADI pertence ao grupo dos ferros fundidos com grafita nodular, um aspecto fundamental para o mecanismo de formação dos cavacos. Nesse tipo de formação de cavacos, não há um processo contínuo de cisalhamento na zona de corte, como é geralmente comum na usinagem de aço, mas um processo seqüencial de compressão, cisalhamento e ruptura.

Em contrapartida à usinagem do aço, ocorrem menores solicitações mecânicas e, respectivamente, menores solicitações térmicas. Porém, estas solicitações são distribuídas em uma pequena zona e oscilam com a frequência da segmentação dos cavacos, que pode chegar a até alguns kHz.

Os tipos dúcteis de ADI VER-GJS-800-8 até VER-GJS1000-5 apresentam uma combinação bastante incomum para materiais ferrosos com alta resistência e alto alongamento à ruptura, além de alta tendência ao endurecimento (precipitação de martensita).

Essa combinação especial de propriedades resulta em uma dinâmica relativamente alta na força de corte que pode ultrapassar consideravelmente a evolução das forças na formação de cavacos contínuos, apesar da baixa média dos valores. Nas classes mais resistentes de ADI, as proporções dinâmicas ficam levemente menores, por terem maior fragilidade.

Outro aspecto que deve ser considerado mais detalhadamente é a tendência de endurecimento, que geralmente é atribuída à formação de martensita na estrutura.

Finalmente, a curva de aumento da força de deformação é significativamente mais inclinada do que a do aço ou das outras amostras de ferro fundido. Este alto valor de subida pode ser explicado pelo endurecimento que ocorre com a formação de martensita.

Outros autores [Ahmadabadi, 1997; Klocke, 2007; Lin, 2002; Moncada, 1998; Seker, 2005]

também observaram a ocorrência de martensita decorrente da deformação a frio. Entretanto, uma predominância sobre a usinagem foi presumida somente quando o tempo de permanência na temperatura de transformação foi insuficiente.

A influência também pode ser comprovada em ensaios de usinagem, porém não exclui a formação de martensita durante a usinagem de uma estrutura suficientemente estabelecida de ADI.

Devido à forma arredondada da aresta de corte não é possível evitar a camada de martensita em uma divisão convencional do corte (corte longitudinal típico no torneamento). Sempre existe um contato da ferramenta com a zona superficial da peça. Uma profundidade de corte maior da ferramenta de corte (que produz um corte mais profundo) para que ele seja efetuado “por baixo” da camada superficial de martensita é então recomendada [Brandenberg, 2002].

Como é possível constatar uma zona superficial encruada após a usinagem e também medir freqüentemente um máximo de desgaste na zona de contato descrita, pode-se concluir que esse efeito exerce influência sobre a usinagem.

É até possível partir da hipótese de que a transformação da austenita ocorre durante o processo de formação do cavaco, influenciando imediatamente a solicitação mecânica na aresta de corte.

Ao lado dos efeitos descritos até aqui, que influenciam principalmente a solicitação mecânica nas ferramentas de corte, existem também os efeitos térmicos da microestrutura específica do ADI, que difere da microestrutura do ferro fundido nodular convencional. Estes últimos são condicionados principalmente à alta capacidade de deformação da estrutura ausferrítica.

Ferramentas de metal duro do grupo K são materiais típicos de corte para o torneamento de metais ferrosos. Eles apresentam alta resistência ao desgaste e resistência ao calor relativamente baixa.

A resistência ao desgaste e a dureza dos materiais de corte são importantes, em razão da abrasividade. Por esse motivo, uma série de materiais de corte com alta dureza destacou-se na usinagem de ferro fundido.

Por meio de processos mecânicos de atrito entre o cavaco e a aresta de corte e, principalmente por causa da maior solicitação térmica, ocorre, na usinagem do ADI, um desgaste distinto por craterização próximo à aresta de corte que pode provocar a quebra da aresta de corte

após o alcance de uma determinada vida [Klocke, 2007].

Algumas considerações que devem ser observadas na usinagem do ferro fundido ADI são:

- Para as ferramentas de corte, em princípio, devem ser usados materiais de corte com maior dureza. Para muitos processos, tais como o torneamento, o fresamento e a furação, utiliza-se o metal duro do grupo K. O torneamento também é parcialmente possível de ser feito com o uso de ferramentas cerâmicas.
- A velocidade de corte deve ser levemente reduzida, em comparação com a usada na usinagem do ferro fundido nodular perlítico. A influência da velocidade de corte no torneamento é grande.
- Os processos de fabricação com corte contínuo (por exemplo, o torneamento, a furação, o rosqueamento) devem ser realizados, em princípio, com fluido lubrificante, em virtude das temperaturas de usinagem maior e características de transmissão de calor do ADI [Brandenberg, 2002].
- Nos processos de fabricação com corte descontínuo (por exemplo, no fresamento), é possível alcançar vida útil significativamente melhor com a eliminação do fluido lubrificante. O motivo é a sensibilidade dos metais endurecidos do grupo K a choques térmicos, que resulta na formação de trincas na aplicação de solicitações térmicas alternantes [Brandenberg, 2002].

2.7 Coeficiente de atrito dinâmico

O coeficiente de atrito dinâmico entre as superfícies avaliadas é calculado a partir da força tangencial entre as superfícies em deslizamento ou a força de atrito dinâmico.

$$F_{\text{atc}} = \mu_c \cdot N \quad \Rightarrow \quad \mu_c = F_{\text{atc}} / N \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

F_{atc} = força de atrito dinâmico (no teste força tangencial)

μ_c = coeficiente de atrito dinâmico

N = força normal (no teste = 2,0 Kg.)

Esta relação é conhecida há muitos anos e permanece aceitável para muitos propósitos. Se a força normal N ou a velocidade tornarem-se tão excessivamente grandes, esta relação falha em virtude do calor gerado. Apesar do coeficiente de atrito ser assumido como constante, atualmente sabe-se que mesmo o coeficiente para atrito seco é sensível a muitas influências.

O atrito de escorregamento ocorre quando se estabelece o movimento relativo entre duas superfícies que estejam em contato. [Stoeterau, 2004].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para verificar a adequação e o desempenho do ferro fundido austemperado ADI Grau 3 em comparação com o aço SAE 1045 forjado temperado e revenido, foram avaliadas as propriedades mecânicas, composição química e microestrutura dos materiais:

- Ferro fundido nodular perlítico sem beneficiamento (figura 3.1),
- Ferro fundido nodular perlítico com beneficiamento ADI Grau 3),
- Aço forjado SAE 1045 temperado e revenido.



Figura 3.1. Fofo nodular perlítico, sem beneficiamento, material fornecido pela empresa Tupy para a confecção dos corpos de prova.

Para a verificação da usinagem de acabamento em operação de torneamento foi utilizado o material Ferro fundido austemperado Grau 3 (ADI).

O material ferro fundido nodular perlítico sem beneficiamento foi analisado somente como referência antes do tratamento térmico.

3.1 Ensaio de Tração.

Os ensaios de tração dos corpos de provas padronizados foram executados segundo norma ASTM E 8 em equipamento de tração/compressão Wolpert para cargas de até 200 KN, pertencente à MWM International (figura 3.2).

A velocidade do ensaio foi de 0,5 mm/minuto.



(a)



(b)

Figura 3.2 (a) equipamento de tração/compressão Wolpert. (b) Detalhe da fixação do corpo de prova.

3.2 Ensaio de desgaste por escorregamento a seco tipo Pino sobre disco.

Neste trabalho, o ensaio de desgaste por escorregamento a seco foi escolhido, apesar dos componentes trabalharem com lubrificação dentro dos motores. Esta condição simula uma condição extrema de trabalho, onde ocasionalmente pode ocorrer a falha do filme de óleo

lubrificante ocorrendo o contato metal – metal dos componentes, como por exemplo durante a partida do motor quando a pressão do óleo é muito baixa.

A ausência do lubrificante, além de simular a pior condição de aplicação também permite acelerar o desgaste dos componentes em estudo.

Os ensaios de desgaste por escorregamento a seco tipo pino sobre disco ou *Pin on Disc* do inglês, foram realizados em tribômetro desenvolvido e fabricado pelo laboratório CCM do ITA figura 3.3, capaz de medir forças tangenciais (força de atrito dinâmico) de 0 a 2,0 Kgf.



(a)



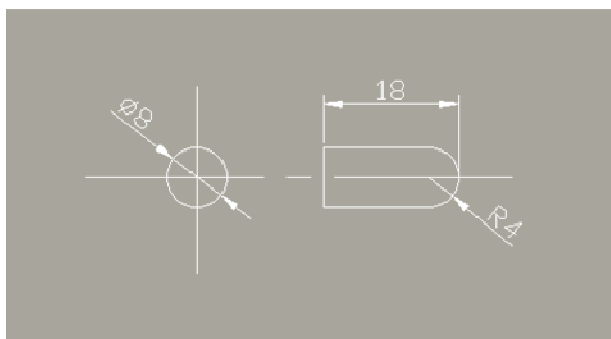
(b)

Figura 3.3(a) tribômetro para ao ensaio de Pino sobre disco (b) detalhe pino e disco.

Os ensaios foram executados com os seguintes parâmetros:

- Velocidade 0,6 metros por minuto,
- Carga sobre o pino 2,0 Kg,
- Umidade relativa do ar 33 +/- 2 %,
- Temperatura ambiente 25 +/- 2 °C,
- Diâmetro da pista 22 mm,
- Percurso total por pino 2.100 metros.

Os pinos corpos de prova avaliados foram usinados com as dimensões de 8 mm de diâmetro por 18 mm de comprimento com uma das extremidades em forma de uma semi-esfera de diâmetro de 8 mm, conforme figuras 3.4a e 3.4b.



(a)



(b)

Figura 3.4 (a) dimensões do pino para ensaio pino sobre disco (b) foto do pino do ensaio pino sobre disco.

Os pinos utilizados nos ensaios foram confeccionados nos materiais:

- ADI grau 3 e
- Aço SAE 1045 forjado temperado e revenido (material original do eixo comando de válvulas).

Os pinos em aço forjado SAE 1045 temperado e revenido com 59 HRC foram extraídos dos cames do eixo comando de válvulas coincidindo a extremidade semi esférica co pino com a ponta do ressalto dos cames, conforme ilustrado na figura 3.5.

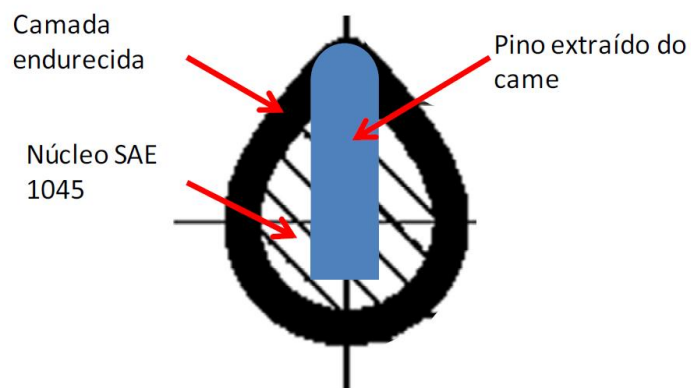


Figura 3.5 Ilustração da posição onde o corpo de prova em aço SAE 1045 foi extraído no came do eixo comando de válvulas

Os discos utilizados nos ensaios como contra peça foram extraídos do tucho (seguidor que fica em contato com os comes do eixo comando de válvulas) figura 3.6, formando um disco nas dimensões de 31 mm de diâmetro por 4 mm de espessura.

Os discos foram confeccionados no material:

- Ferro fundido cinzento coquilhado e nitretado com 51RC de dureza superficial na camada de 4 a 12 microns (material original dos tuchos do motor Diesel).

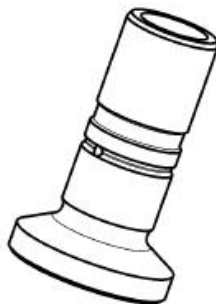
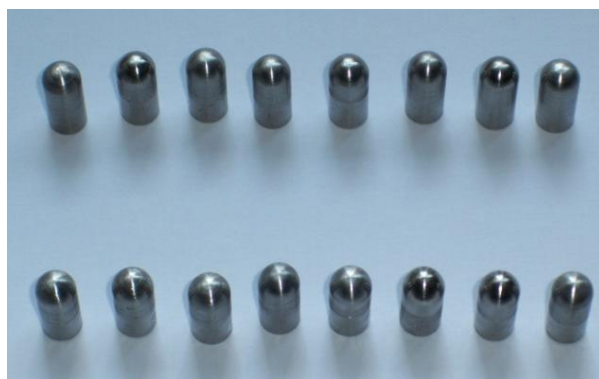


Figura 3.6. Tucho de válvula



(a)



(b)

Figura 3.7 Corpos de prova fabricados para o ensaio de desgaste pino sobre disco. (a) discos e (b) pinos.

Foi utilizada uma balança analítica de precisão Ohaus pertencente ao laboratório de análise de materiais da MWM-International para a medição da massa. Os corpos de prova ensaiados foram lavados em cuba de ultrasom e secados em estufa antes de cada medição.



Figura 3.8. Balança analítica de precisão Ohaus.

3.3 Ensaio de dureza.

A dureza dos corpos de prova foi medida no laboratório de análises de materiais da MWM International. Os equipamentos utilizados são do fabricante ENCO e realizam as medições através de software de imagem.

No ferro fundido nodular foi avaliada a dureza Brinell com esfera de 10 mm e carga de 3000 Kg. No ADI grau 3 foi avaliada a dureza Rockwell C com cone de diamante de 120° e carga de 150 Kg.

Para efeito de comparação, todas as durezas foram convertidas para a escala Rockwell C. Os equipamentos utilizados aparecem da figura 3.9.

Foi utilizado um equipamento e método de medição adequado para cada ensaio em função do valor medido.

O equipamento do lado esquerdo da foto avalia durezas nas escalas Brinell de 10 a 750 kg; Rockwell HRA, HRB, HRC e Vickers de 3 a 10kg. e o equipamento do lado direito da foto mede dureza Brinell de 30 a 3000kg.



Figura 3.9. Durômetros ENCO

3.4 Análise da composição química.

Os resultados da composição química dos materiais foram obtidos através da média de 5 amostras.

A composição química do material testado foi analisada em espectrômetro de emissão ótica pertencente à MWM-International (figura 3.10).



Figura 3.10. Equipamento SpectroMax para análise de composição química.

A análise das porcentagens de carbono e enxofre também foi executada no laboratório da MWM-International no equipamento Leco série CS 230 (figura 3.11).



Figura 3.11. Equipamento Leco série CS 230 para análise da porcentagem de carbono e enxofre.

3.5 Análise Metalográfica.

A análise metalográfica foi realizada na MWM International com microscópio óptico POLYVAR Reicheter-Jung com amplificação de 25 a 2000 vezes (figura 3.12).



Figura 3.12. Foto do microscópio óptico POLYVAR Reicheter-Jung.

3.6 Usinagem

Os parâmetros da usinabilidade do ADI grau 3 (após tratamento térmico) foram avaliados na operação de acabamento em torno.

Foram executados os seguintes testes:

- medição da rugosidade da superfície usinada por meio da variação de cinco profundidades de corte axial ($a_p = 0,2; 0,4; 0,7; 1,2$ e $1,5$ mm) e quatro avanços por rotação ($f_z = 0,05; 0,10; 0,15$ e $0,20$ mm/revolução).

- medição da forma de cavaco. Em todos os ensaios foram coletados cavacos para serem analisados quanto a forma e tamanho.

- avaliação da força de corte em função da variação da profundidade de corte axial (a_p) e avanços por rotação (f_z) nos mesmos parâmetros do item anterior. Esta avaliação foi baseada na potência consumida pela máquina ferramenta durante as operações de usinagem de acabamento.

Todas as operações de usinagem foram realizadas com fluido refrigerante/lubrificante, por se tratar de corte contínuo.

3.6.1 Máquina Ferramenta.

Os ensaios de usinagem foram realizados em torno universal do laboratório CCM do ITA (figura 3.13).

– Modelo:	E 280;
– Fabricante:	Indústrias ROMI S.A.;
– Comprimento máximo torneável entre pontas:	400 mm;
– Diâmetro máximo torneável:	280 mm;
– Potência total instalada:	30 kW;
– Faixa de velocidades:	4 a 4000 rpm;
– Avanços rápido eixo X:	24 m/min.;
– Avanços rápido eixo Y:	18 m/min.;
– Avanços rápido eixo Z:	30 m/min.;



Figura 3.13. Torno de controle numérico Romi E 280.

3.6.2 Ferramenta de corte e porta-ferramenta

As ferramentas utilizadas na usinagem foram pastilhas de metal-duro revestida com as seguintes especificações:

- fabricante: ISCAR

 - geometria: WNMA 080412

 - classe: IC5005 (P05 – P15)

 - Cobertura CVD compósitos + Al_2O_3 (SUMO TEC)

- fabricante: SANDVIK

 - geometria: WNMG 080404

 - classe: GC 4215 (P15)

A fixação da ferramenta foi por suporte porta ferramenta fabricante: SANDVIK

3.6.3 Medida da rugosidade da superfície usinada Ra e Rz.

Para a medida da rugosidade da superfície usinada, parâmetros Ra e Rz foi utilizado equipamento rugosímetro portátil do fabricante Mitutoyo modelo SJ 201P do laboratório CCM do ITA (figura 3.14).

Método de detecção por indutância diferencial, com ponta de raio de 5 microns em diamante, faixa de medição de -200 μm a + 150 μm resolução de 0,01 μm a 0,4 μm e temperatura de operação de 5 a 40 °C. Compatível com as normas ISO, JIS, DIN e ANSI.



Figura 3.14. Rugosímetro portátil Mitutoyo SJ 201P.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas dos materiais estudados estão na tabela 3.1, nesta tabela estão descritos os valores da tensão de ruptura, tensão de escoamento, alongamento e dureza para:

- fofo nodular sem beneficiamento,
- fofo nodular austemperado (ADI grau 3).
- aço SAE 1045 forjado sem beneficiamento.
- aço SAE 1045 temperado e revenido.

Tabela 3.1. Propriedades mecânicas dos materiais estudados.

Material	Tensão de Ruptura (Mpa)	Tensão de Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)	Dureza Rockwell (C)
Fofo Nodular	705	430	4,7	22
ADI G3	1190	1000	2,2	42
SAE 1045 Forjado	650	370	20	14
SAE 1045 temperado e revenido	1680*	1200*	2,5*	59
* valores típicos, podem variar com os diferentes processos, temperaturas, taxas de resfriamento e tempos do tratamento térmico				

4.2 Análise da composição química.

A porcentagem de cada elemento químico na composição dos materiais estudados segue na tabela 3.2. Devido os materiais ferro fundido nodular e ADI grau 3 terem sido fundidos em fornecedores diferentes, é possível se identificar diferenças de composições entre eles.

O resultado da composição química foi obtido através da média de 3 amostras de cada material analisado para os componentes Carbono e Enxofre e 5 amostras para os demais elementos químicos.

Tabela 3.2. Composição química dos materiais analisados (26 elementos) + Carbono e Enxofre.

Elemento Químico	Porcentagem do elemento químico		
	ADI Grau3	Fofo Nodular	SAE 1045
C	2,7982	2,9717	0,4230
S	0,4531	0,0455	0,0230
Si	2,2700	1,9200	2,1800
Mn	0,1570	0,1250	0,7200
P	0,0077	0,0120	0,0260
Cr	0,0340	0,0300	0,1410
Ni	3,7400	0,0210	0,1200
Mo	0,1350	0,0880	0,0019
Al	0,0055	0,0062	0,0370
Cu	0,9300	0,5300	0,0042
Co	0,0160	0,0160	0,0035
Ti	0,0140	0,0140	0,0021
Nb	0,0011	<0,0010	<0,0010
V	<0,001	<0,0010	<0,0010
W	<0,007	<0,0070	<0,0070
Pb	0,0230	0,0180	<0,0010
Mg	0,0420	0,0280	***
B	<0,0002	<0,0002	<0,0005
Sb	0,0093	<0,0010	0,0075
Sn	0,0057	0,0048	0,0021
Zn	>0,0320	0,0250	0,0010
As	<0,0010	<0,0010	0,0041
Bi	<0,0015	<0,0015	<0,0015
TA	***	***	0,0230
Ca	***	***	0,0008
Ce	0,0068	<0,0020	<0,0020
Zr	<0,0015	<0,0015	<0,0015
La	~0,028	~0,026	0,0010
Se	<0,0020	<0,0020	0,0090
N	>0,0120	~0,011	0,0046
Fe	<79,3	<82,7	98,3
C_{eq}	13,99	15,09	***

4.3 Microestrutura

A microestrutura dos materiais estudados foi analisada no laboratório de materiais da MWM-International.

- Ferro fundido nodular perlítico

A micrografia do ferro fundido nodular perlítico, sem beneficiamento, mostra, na figura 4.1a, a morfologia da grafita, forma IV e tamanhos 5 a 6.

As micrografias das figuras 4.1b e 4.1c, para o mesmo material, mostram a estrutura do núcleo com aproximadamente 90% de Perlita e 10 % de ferrita.

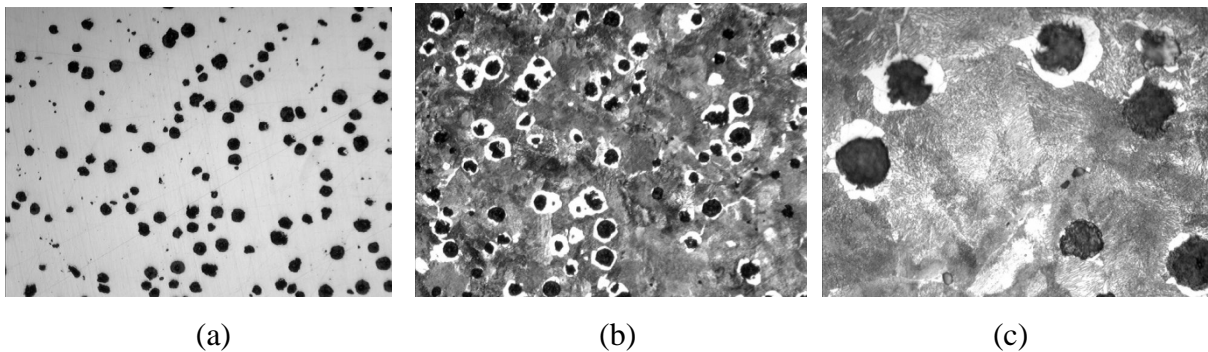
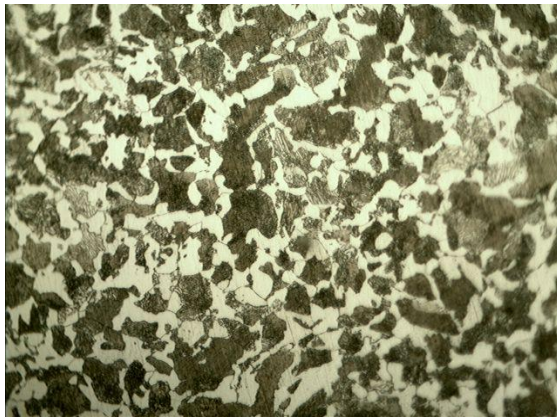


Figura 4.1 (a). Fofo nodular aumento 100x sem ataque. (b) Fofo nodular aumento 100x com ataque de nital a 3%. (c) Fofo nodular aumento 500x com ataque de nital a 3%.

- Aço SAE 1045

A micrografia da figura 4.2a. mostra a estrutura normalizada do núcleo do material, sem tratamento térmico, composta por perlita e ferrita e a micrografia da figura 4.2b mostra a camada endurecida por têmpera de indução e revenida do aço SAE 1045 com a dureza de 59HRC tendo como microestrutura a martensita revenida.



(a)



(b)

Figura 4.2 aço SAE 1045 (a) núcleo sem tratamento térmico aumento 325x com ataque de nital a 3%. (b) superfície temperada e revenida aumento de 100x com ataque de nital a 3%.

- Ferro fundido austemperado ADI grau 3.

A micrografia da figura 4.3a feita com uma ampliação de 100x e sem ataque mostra a morfologia da grafita, forma IV e tamanho 5 a 6.

As micrografias das figuras 4.3b e 4.3c feitas com ataque de Nital a 3% e nas ampliações de 100x e 500x respectivamente, mostram a estrutura do núcleo constituída de ferrita acicular e austenita estabilizada de alto carbono denominada ausferrita e a forma da grafita é a nodular. A ausferrita da Microestrutura do ADI proporciona a boa resistência mecânica do material e a excelente resistência ao desgaste, sendo que a grafita nodular contribui como agente lubrificante na solicitação ao desgaste.

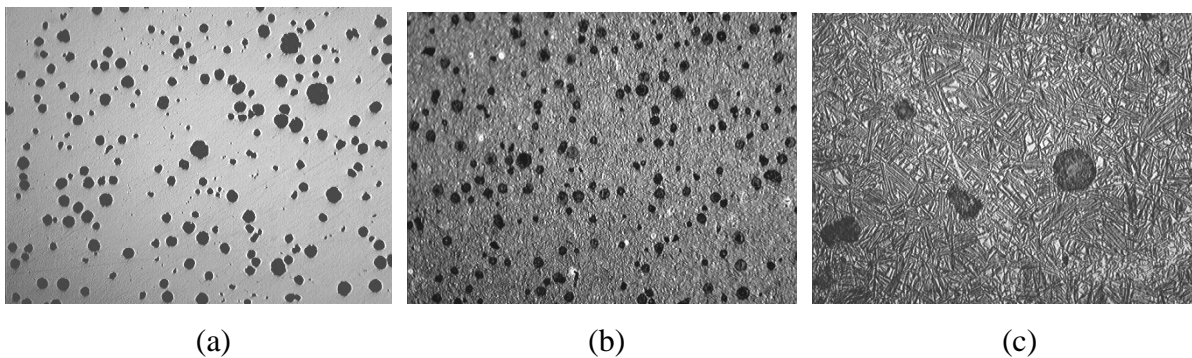


Figura 4.3 ADI grau 3 (a) aumento 100x sem ataque. (b) aumento 100x com ataque de nital a 3%.
(c) aumento 500x com ataque de nital a 3%.

4.4 Ensaio de desgaste por escorregamento a seco tipo pino sobre disco.

A figura 4.4 mostra um pino em ADI grau 3 e o respectivo disco após o ensaio de desgaste pino sobre disco. Os resultados do ensaio estão na tabela 4.1.



Figura 4.4. Foto Pino ADI G3 e disco após ensaio.

Tabela 4.1. Resultados do teste pino contra disco para o pino em ADI grau 3

ADI Grau 3																
Pino				Disco				força tangencial (Kg)								
Corpo de prova	Peso (g)			Corpo de prova	Peso (g)			0 a 300 m	300 a 600 m	600 a 900 m	900 a 1200 m	1200 a 1500 m	1500 a 1800 m	1800 a 2100 m	média	Coef. Atrito
	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	dif. Peso disco (g)		Peso Inicial (g)	Peso final (g)	dif. Peso disco (g)									
1	5,5588	5,5581	0,0007	1	22,7009	22,6927	0,0082	1,7	1,3	1,5	1,49	1,53	1,56	1,56	1,52	0,76
3	5,6877	5,6866	0,0011	3	22,5136	22,5098	0,0038	1,45	1,6	1,73	1,75	1,73	1,59	1,51	1,62	0,81
4	5,8388	5,8382	0,0006	14	22,8439	22,8374	0,0065	1,56	1,73	1,64	1,56	1,5	1,53	1,51	1,58	0,79
		Média	0,0008			Média	0,0062								Média	0,79

Velocidade tangencial = 0,6 m/min; Carga sobre o pino= 2,0 kg; Diâmetro da pista = 22 mm;
 Percurso total por pino= 2.100 m; Umidade relativa do ar = 33 +/- 2 %; Temperatura ambiente= 25 +/- 2 °C

Na avaliação dos pinos em aço, ocorreram maiores vibrações e emissão de ruído durante os testes em comparação aos ensaios com os pinos de ADI (tabela 4.2).

Toda vez que a vibração aumentava, a força tangencial diminuía, fato que pode ser explicado pelo desprendimento de partículas das superfícies das peças em atrito causando irregularidades na pista e a falta do contato contínuo entre as superfícies.

Tabela 4.2. Resultados do teste pino contra disco para o pino em aço SAE 1045 temperado e revenido.

Aço SAE 1045 temperado e revenido 55 HRC																	
Pino				Disco				força tangencial (Kg)								Coef. Atrito	
Corpo de prova	Peso (g)			Corpo de prova	Peso (g)			0 a 300 m	300 a 600 m	600 a 900 m	900 a 1200 m	1200 a 1500 m	1500 a 1800 m	1800 a 2100 m	média		
	Peso Inicial (g)	Peso final (g)	dif. Peso disco (g)		Peso Inicial (g)	Peso final (g)	dif. Peso disco (g)										
1	5,9645	5,9640	0,0005	11	22,1741	22,1691	0,0050	1,53	1,62	1,6	1,63	1,55	1,5	1,49	1,56	0,78	
3	5,9969	5,9960	0,0009	13	22,7840	22,7758	0,0082	1,48	1,34	1,44	1,44	1,42	1,32	1,34	1,40	0,70	
4	6,4398	6,4386	0,0012	4	22,8095	22,8041	0,0054	1,8	1,64	1,7	1,7	1,54	1,59	1,57	1,65	0,82	
		Média	0,0009			Média	0,0062									Média	0,77

Velocidade tangencial = 0,6 m/min; Carga sobre o pino= 2,0 kg; Diâmetro da pista = 22 mm;
 Percurso total por pino = 2.100 m; Umidade relativa do ar = 33 +/- 2 %; Temperatura ambiente= 25 +/- 2 °C

Para as mesmas condições de teste, o material ADI grau 3 mostrou um menor desgaste quando comparado ao aço SAE 1045 temperado e revenido (figura 4.5a). Esses resultados estão de acordo com os observados por Lerner et. al. (2007), que confirmam uma melhor resistência do ADI ao desgaste quando comparado ao aço médio carbono temperado e revenido [Lin, 2002].

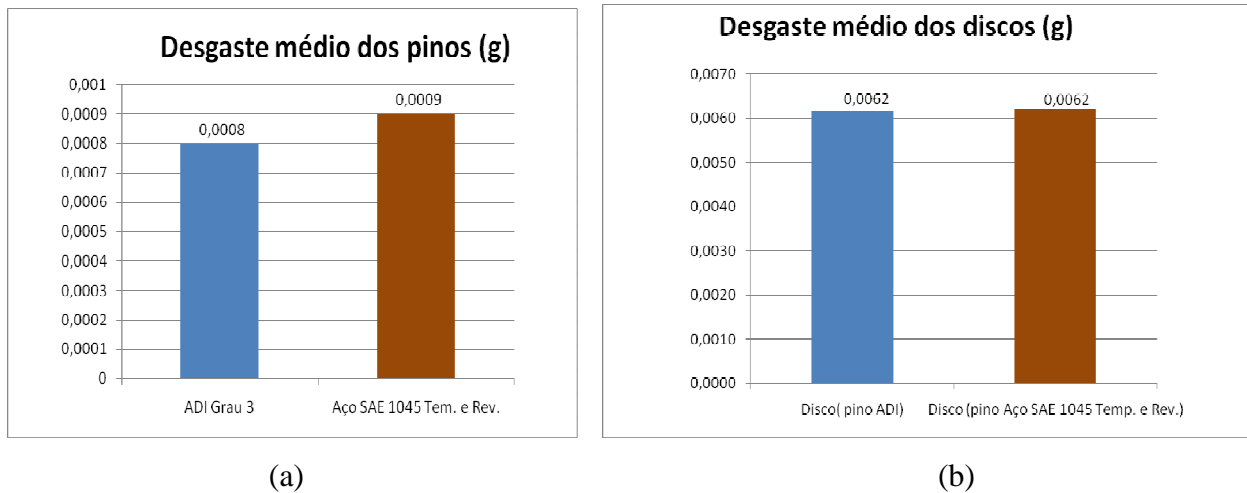


Figura 4.5. Desgaste médio em massa dos pinos (a) e dos discos (b) testados no ensaio pino sobre disco.

Apesar da maior resistência ao desgaste, o ADI não foi mais agressivo no desgaste da contra peça que apresentou a mesma média de desgaste em massa para os dois materiais de pino avaliados figura 4.5 b.

Este comportamento em relação ao desgaste do ADI é explicado pela composição da sua microestrutura que possui uma matriz ausferrítica (ferrita acircular + austenita estabilizada com alto teor de carbono) que garante uma elevada resistência ao desgaste e nódulos de grafita que atuam como agente lubrificante no desgaste por deslizamento entre as superfícies [Mädler, 2000].

Os resultados do coeficiente de atrito dinâmico entre as superfícies avaliadas nas duas condições de teste estão no gráfico abaixo, figura 4.6.

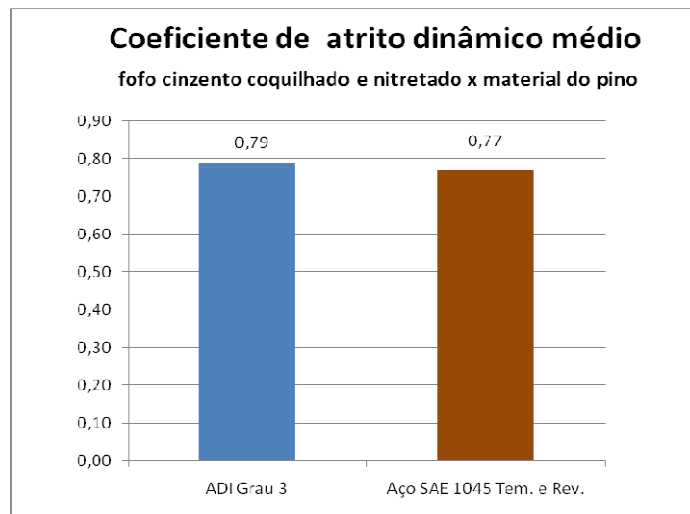


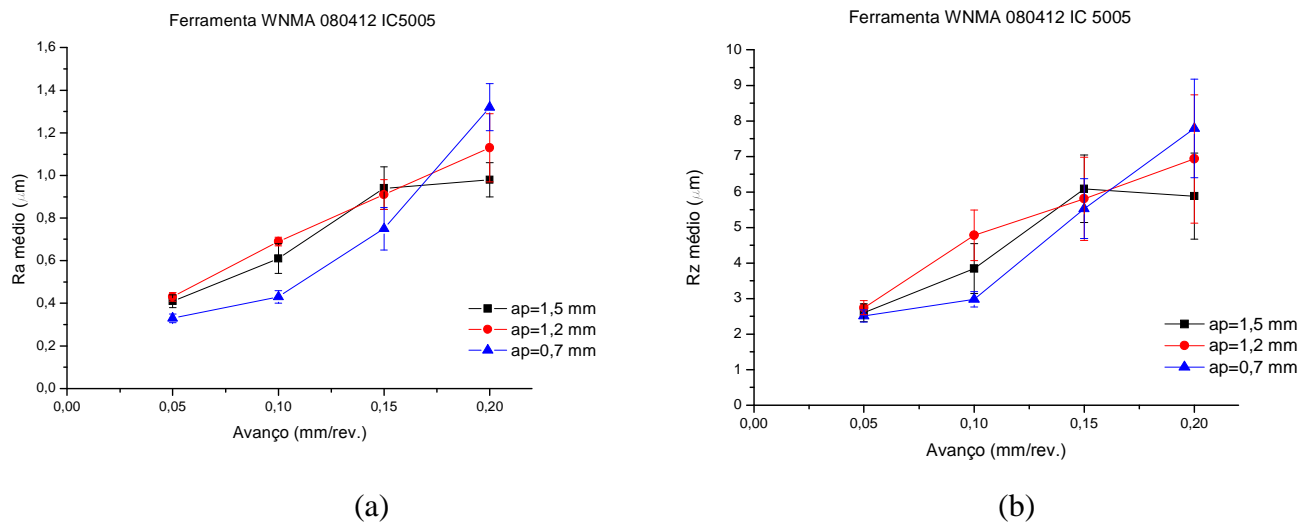
Figura 4.6. Coeficiente de atrito entre as superfícies testadas.

O menor valor, calculado para o coeficiente de atrito dinâmico, no ensaio dos pinos de aço pode ser atribuído às maiores vibrações e ruídos, verificados durante a execução dos ensaios neste material.

4.5 Análises dos testes de usinagem de acabamento

4.5.1 Rugosidade

Os primeiros testes de análise das superfícies usinadas foram realizados com ferramenta de corte com raio de quina $r_e = 1,2$ mm (código da ferramenta WNMA080412) (figura 4.7). Profundidades de corte (a_p) abaixo da metade do raio de quina não foram avaliadas pois ocasionam um aumento de vibração durante o corte do material, devido à distribuição de forças sem uma definição específica.



$V_c = 80\text{m/min}$; $a_p = 1,5$; $1,2$ e $0,7$ mm, $f = 0,05$; $0,10$; $0,15$ e $0,20$ mm/rot.

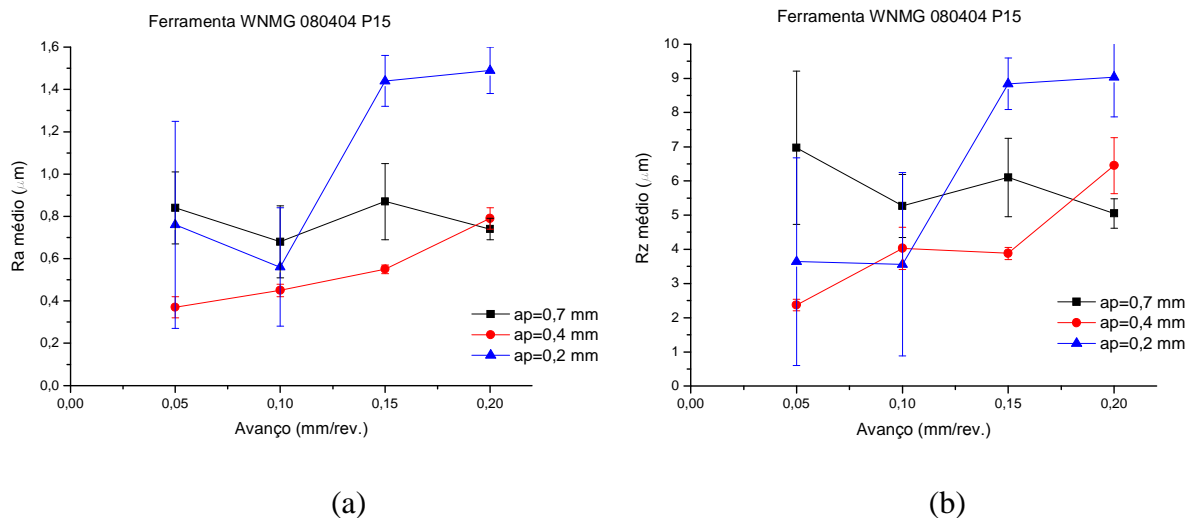
Figura 4.7. Acabamento na usinagem de torno (a) Ra [μm] e (b) Rz [μm] com a ferramenta com raio de corte de $1,2$ mm.

Os melhores acabamentos das superfícies usinadas foram obtidos para as baixas profundidades de corte ($a_p = 0,7$ mm) e baixos avanços (0,05 a 0,15 mm/rot.).

Nas três profundidades de corte avaliadas, com o aumento do avanço aumenta também o desvio padrão.

Esse resultado era de se esperar, pois o aumento do avanço (f) exerce uma influência significativa no acabamento da superfície usinada, enquanto maiores profundidades de corte (a_p) geram maiores esforços e vibrações [Gomes, 1995].

Para a ferramenta com raio de quina $r_\epsilon = 0,4$ mm (código da ferramenta WNMA080404) com os mesmos parâmetros avanço e velocidade de corte, observaram-se resultados piores (figura 4.8).



$v_c = 80$ m/min; $a_p = 0,7; 0,4$ e $0,2$ mm, $f = 0,05; 0,10; 0,15$ e $0,20$ mm/rot.

Figura 4.8 Acabamento na usinagem de torno (a) Ra [μm] e (b) Rz [μm] com a ferramenta com raio de corte de 0,4 mm.

Percebe-se que para baixas profundidades de corte, com uma quina “quase viva”, a instabilidade do corte gera acabamentos com resultados dispersos para a superfície usinada.

Para a profundidade de corte $a_p = 0,4$ mm, o desvio padrão foi menor e mais estável quando comparado às profundidades $a_p = 0,2$ mm e $a_p = 0,7$ mm, mostrando um ponto difícil de aplicar em linha de produção onde qualquer variação no processo implica em perda da qualidade.

A rugosidade alcançada na operação de usinagem, $R_z = 2,37$ [μm], intermediária à rugosidade especificada para a região dos ressaltos (cames) e a rugosidade especificada para a região dos mancais do eixo comando de válvulas, sugere uma avaliação do ADI na aplicação real do eixo comando de válvulas no motor Diesel. A microestrutura do ADI com a grafita na forma nodular que atua como agente lubrificante pode contribuir para a aplicação.

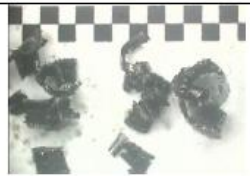










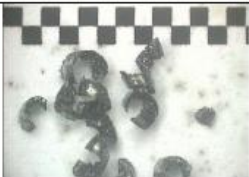

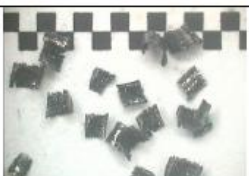










4.5.2 Cavacos

Em todas as condições testadas, os cavacos gerados na usinagem do ADI grau 3 são avaliados como passíveis para produção em linha (figura 4.9).

A forma do cavaco gerado pela ferramenta de corte WNMA080412 é a segmentada como característica dos cavacos dos materiais ferrosos devido à presença da grafita que interrompe a continuidade da matriz metálica segmentando o cavaco gerado e mostra resultados consistentes, ou seja, o tamanho do cavaco aumenta em função do aumento da profundidade de corte a_p (mm) e também em função do aumento do avanço f (mm/rot.).

A forma dos cavacos gerados pela ferramenta de corte WNMG080404 variou entre a segmentada e a espiral segmentada e os cavacos não seguiram uma linha consistente como os cavacos da ferramenta WNMA 080412.

O menor tamanho do cavaco foi na profundidade de corte $a_p=0,4$ mm e avanço $f=0,05$ mm/rot..

a_p/f	0,05 mm	0,10 mm	0,15 mm	0,20 mm
Ferramenta de corte WMNG 080404				
0,2 mm				
0,4 mm				
0,7 mm				
Ferramenta de WMMA 080412				
0,7 mm				
1,2 mm				
1,5 mm				

Obs. Dimensão dos quadrados da escala = 1mm^2 .

Figura 4.9. Cavacos gerados em função dos parâmetros de corte empregados.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo:

1 - Verificar a adequação e o desempenho do ferro fundido austemperado ADI grau 3 (material que possui as propriedades mecânicas para aplicação em eixos de comando de válvulas).

2 - Avaliação das rugosidades na operação de usinagem em torno.

As propriedades mecânicas dos materiais comparados (ADI grau 3 x Aço SAE 1045 Temperado e Revenido) foram avaliadas em ensaios de tração, dureza e desgaste do tipo “pin-on-disc”.

Os ensaios demonstraram compatibilidade na resistência mecânica e apesar da menor dureza do ADI grau 3, 42 HRC, quando comparado com o aço SAE 1045 temperado e revenido com 59 HRC de dureza superficial, a mesma resistência ao desgaste foi observada para ambos os materiais. Nenhum dano maior foi observado no material da contra peça.

Assim, pode se considerar o uso de ADI em substituição ao aço nos quesitos resistência ao desgaste, em função dos testes de pino sobre disco.

A relação com a usinabilidade do ADI grau 3 foi avaliada por meio de formação dos cavacos e da análise das rugosidades RA e Rz da superfície usinada.

Além de uma boa usinabilidade para aplicação em linha de produção(cavaco segmentado), os valores da rugosidade superficial encontrados na operação de torneamento do ADI grau 3 ($R_z=2,37 \mu\text{m}$) sugerem, em função das propriedades do ADI, a eliminação da operação de retífica para diversas aplicações, uma vez que este acabamento é superior ao especificado para os cames ($R_z = 2,5 \mu\text{m}$) e próximo ao especificado para os mancais ($R_z = 2,0 \mu\text{m}$) do eixo comando de válvulas.

Sugerem-se ainda para próximos trabalhos as seguintes análises:

a. Realização de teste em bancada

O desgaste da superfície do ressalto do eixo comando de válvulas poderá ser avaliado em teste de bancada simulando a aplicação do componente no motor com o objetivo de avaliar comparativamente em uma mesma peça o desempenho de materiais diferentes em relação ao original. Este eixo comando de válvulas (figura 5.1) foi projetado para ter os ressaltos montados sobre um eixo de seção quadrada, desta maneira é possível se avaliar os diferentes materiais trabalhando sob a mesma condição em um único teste.

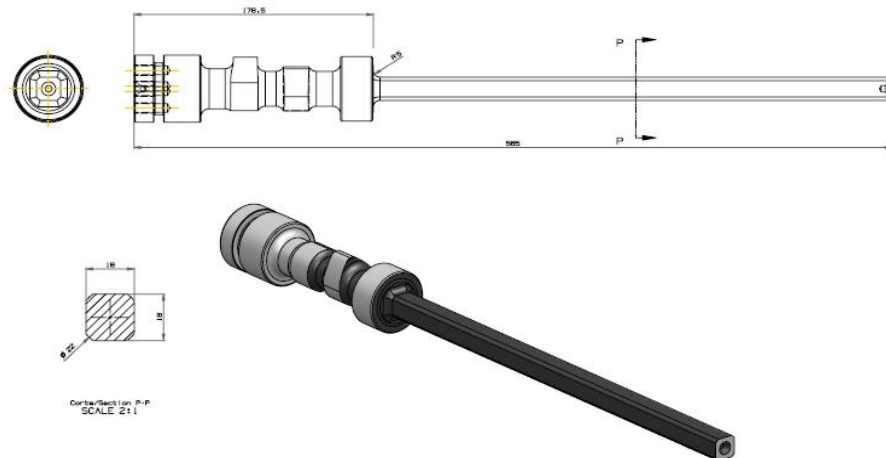


Figura 5.1. Modelo de comando de válvula para teste em bancada.

b. Realização de testes de usinabilidade em Ferro fundido Austemperado ADI Grau 2.

Após avaliação de desempenho em motor Diesel do ADI grau 3 para a fabricação de eixo comando de válvulas, fica como sugestão a análise do ADI grau 2 para a fabricação do mesmo componente. Como ADI grau 2 é mais fácil de ser usinado que o ADI grau 3 [Cakir, 2007] uma maior vida das ferramentas de corte proporcionaria uma redução de custos na fabricação do componente.

c. Avaliar ferramentas de corte com raio de quina com valores intermediários aos analisados (0,4 a 1,2mm.).

Apesar de resultados similares de acabamento, o desvio padrão entre as ferramentas testadas foi muito diferente. Ferramentas com raios intermediários de quina ajudariam a identificar uma correlação entre o o raio de quina e o início do aumento do desvio padrão.

d. Experimentar a ferramenta WNMG 080404 com avanço inferior a 0,05 mm/revolução.

Tentar chegar ao resultado objetivo $R_z = 2,0 \mu\text{m}$, uma vez que a rugosidade da superfície usinada é melhor quanto menor é o avanço utilizado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmadabadi, M., Bainitic Transformation in Austempered Ductile Iron with Reference to Untransformed Austenite Volume Phenomenon. Metallurgical and Materials Transactions, volume 28a, 2159, 1997.

Brandenberg, K., Machining Austempered Ductile Iron. Manufacturing engineering vol. 128 No. 5. Livonia, MI. 2002.

Cakir, M.C., Isik, Y., Investigating the machinability of austempered ductile irons having different austempering temperatures and times. Materials and Design 29 (2008) 937–942. 2007.

Canale, L., Revenido, Aula de Engenharia e Ciência dos Materiais I.

Chiaverini, V., Tratamentos Térmicos das Ligas Ferrosas. ABM, São Paulo, 2a. edição, 79-88p 1987.

Chiaverini, V., Aços e Ferros Fundidos. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 7ª edição, 599 p. 1996.

Dictionary of automotive terms, www.motorera.com.

Druschitz, A., Fitzgerald, D. C. Madit: Introducing a New Machinable, Austempered Ductile Iron. SAE Technical paper series 2003-01-0831, 2003.

Ductile Iron Data For Design Engineer, Ductile Iron Society (DIS), <http://www.ductile.org>, 2001.

Ferraresi, D., Fundamentos de Usinagem dos Metais. 5ª Edição, São Paulo, SP, Editora Blücher, 751p, 1977.

Field, M.; Kahle, J. F., Definition de L'usinabilité. B.D.T. n° 30, Usinabilité des Fontes, 1963.

Gallego, J., Notas de aula para a disciplina Materiais de Construção Mecânica I. 2009.

Goldberg, M.; Berry, J.T.; Littlefair, G.; Smith, G. A study of the machinability of an ASTM grade 3 austempered ductile iron. Southhampton, UK; Mississippi, USA, 2005.

Gomes, J. O., Projeto de análise de usinabilidade do ferro fundido nodular austemperado – ADI, 2008.

Gomes, J. O., Características da usinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos SAE 304 e SAE 316 com a variação dos parâmetros metalúrgicos. Dissertação de mestrado, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

Hafiz, M., Influence of heat treatment parameters in a variable austempering temperature process on mechanical properties and fracture of SG-iron. Annual Meeting of the American Foundrymen's Soc. (AFS), 107th Casting Congress, Milwaukee, US, Apr 26-29, 2003 in: Transactions of the American Foundrymen's Society 111, p.715-724, 03-035, 2003.

Hayrynen, K. L., The Production of Austempered Ductile Iron (ADI). World Conference on ADI, Livonia, 2002.

Hayrynen, K.L., Keough, J.R., The status of austempered cast irons in 2007. Paper 08-135 (05). Pdf pag 8 of 11 AFS Schamburg, IL. USA, 2007.

Jawahir, I.S., Luttermelt, C.A.V., Recent Developments in Chip Control Research and Applications. Annals of the CIRP, vol. 42/2/1993, p.659-693, 1993.

Jonsson, H., Rostfreien Stahl Drehen. Werkstatt und Betrieb, N° 127p.69-70, 1994.

Keough, J.R., Austempered Ductile iron, 1998.

Klocke, F.; Klöpper, C.; Lung, D.; Essig, C., Fundamental Wear Mechanisms when machining Austempered Ductile Iron (ADI) Aachen University, Germany, 2007.

Konstruktion –Fachteil Ingenieur – Werkstoffe. N 6, p. 10-12, 2003.

Lahres, M., Grüner, M., Mohrdieck, C., Strategies for Processing New Engineering Materials for Automotive Powertrain Components. DaimlerChrysler AG, Ulm/Germany; UCD –Ireland. 2006

Lerner, Y.S., Kingsbury, G.R., Wear Resistance Properties of Austempered Ductile Iron. ASM International, JMEPEG, 7:48-52, 1998.

Lerner, Y.S.; Kingsbury, G.R., Journal of Materials Engineering and Performance volume 7 (1) USA, 1998.

Lin, C., Chang, C., Influence of heat treatment on fatigue crack growth of austempered ductile iron. Journal Of Materials Science, 37, 709– 716, 2002.

Mädler, K. ; On the suitability of ADI as an alternative material for railcar wheels. Deutsche Bahn, AG – Technical Center Brandenburg-Kirchmöser, Germany, 2000.

Manufacturing Engineering. Vol. 128 No. 5, 2002

Myszka, D., Kaczorowski, M., On the differences between mechanical properties and structure of ductile iron castings austempered using conventional and direct method. International Journal for Manufacturing Science & Technology Vol.7, No. 1, p.33-42.

Modern Casting 85. N. 8, p. 35-37, 1995.

Moncada, O.J, Spicacci R.H, Sikora J.A., Machinability of austempered ductile iron. AFS Trans; 106:39–45, 1998.

Moore, J.D.; Parolini, J.R.; Rundman, K.B., On the kinetic of austempered gray cast. Iron annual meeting of the American foundrymen's soc. (AFS), 107th Casting congress, ,: Transactions of the American foundrymen's Society 111 (2003), p.911-930, 03-110. Milwaukee, US, 2003.

Nigro, F.E.B., Moore, O.M., Curso de motores Veiculares da atualidade e do futuro. Instituto Mauá de Tecnologia. 1993.

Reuter, U., Dissertation TU Darmstadt, 2002.

Seker, U., Hasirci, H., Evaluation of machinability of austempered ductile irons in terms of cutting forces and surface quality. Ankara, Turkey, 2005.

Society of manufacturing engineers. Tool and manufacturing engineers handbook - machining. 4.ed. Dearborn: One S.M.E. Drive,. v.1, 1983.

Stahl. Eisen Prüfblatt 1178-69.

Stoeterau, R., Tribologia, pag.31, Brasil, 2004

Stemmer, C.E., Ferramentas de Corte. 2ª Edição, , 288p, Florianópolis, SC, 1989.

Sorelmetal. Ductile iron data for design engineer, ductile iron society,. p. 84–155, 1990.

Tratamentos Térmicos, Laboratório da Escola Federal de Engenharia Itajubá.

Zabala, A.I., Aceros Inoxidables y Aceros Resistentes al Calor. 1ª Edição, Editorial Limusa S.A, 410p., México, 1981.

Weingaertner, W. L.; Schroeter, R.B., Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas ligas. Convênio UFSC - ALCAN, 80p., Florianópolis, 1991.

Weingaertner, W. L.; Gomes, J. O., Tecnologia de Usinagem do Aço Inoxidável Austenítico (Torneamento Longitudinal Externo). Convênio UFSC - GERDAU, 80p. Florianópolis, 1995.